

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

**УКРАЇНСЬКИЙ
ЖУРНАЛ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 3 (021)
травень – червень 2024

Дніпро 2024

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

А. С. Беліков, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. М. М. Біляєв, д-р техн. наук, Український державний університет науки і технологій, Дніпро. В. І. Большаков, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. Є. Волкова, д-р техн. наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро. В. М. Волчук, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. С. І. Губенко, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. М. Дерев'яно, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Ю. О. Кірічек, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Т. С. Кравчуновська, д-р техн. наук, 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, ПДАБА, Дніпро. Т. Д. Нікіфорова, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. І. Проскураков, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. В. Л. Седін, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. В. Товбич, д-р арх., Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ. О. В. Харлан, к-т арх., ПДАБА, Дніпро. С. В. Шатов, д-р техн. наук, 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 академії, протокол № 4 від 04.07.2024 р.

Сайт видання <http://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 МОЇСЕСНКО
Перекладач Олена ЛЯПІЧЕВА
Редактор та коректор Валентина МАЛОВИК

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

**PRYDNIPROVSKA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE**

**UKRAINIAN JOURNAL
OF CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

№ 3 (021)
May – June 2024

Dnipro 2024

EDITORIAL STAFF :

<i>Chief Editor</i>	Mykola SAVYTSKYI, Doctor of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>
<i>Deputy Chief Editor</i>	Vladyslav DANISHEVSKYI, Doctor of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>
<i>Executive Secretary</i>	Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>
<i>Executive Editor</i>	Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF :

A. S. Belikov, Doctor of Engineering Science, *Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Architecture (PSACEA), Dnipro*. M. M. Biliaiev, Doctor of Engineering Science, *Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro*. V. I. Bolshakov, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. Yev. Volkova, Doctor of Engineering Science, *Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro*. V. M. Volchuk, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. S. I. Gubenko, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. M. Derevianko, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. Yu. O. Kirichuk, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. T. S. Kravchunovska, Doctor of Engineering Science, *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, *PSACEA, Dnipro*. T. D. Nikiforova, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. I. Proskuriakov, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic", Lviv*. V. L. Siedin, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. V. Tovbych, Doctor of Architecture, *Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv*. O. V. Kharlan, Candidate of Architecture, *PSACEA, Dnipro*. S. V. Shatov, Doctor of Engineering Science, *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 ИП – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.
Founder & Publisher	State Higher Education Institution "Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Architecture". Issued 6 times a year.
Recommended for publication by	Academic Board of the Academy, no. 4 from 04.07.2024
Journal website	http://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). <i>Electronic Libraries and search engines</i> : Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Vernadsky National Library of Ukraine.
ISSN	2710-0367 (Print) 2710-0375 (Online)
	<i>Art & Technical Editor</i> Serhii MOISEIENKO <i>Translator</i> Olena LIAPICHEVA <i>Editor & Proofreader</i> Valentyna MALOVYK

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Беліков А. С., Яланський О. А., Барабанов С. С., Слащова О. А., Іконніков М. Ю. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	7
Балашова Ю. Б., Дем'яненко В. В., Трегуб О. В., Чепурна К. О., Балашов А. О. ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У БУДІВНИЦТВІ ПОКРИТТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ.....	19
Бегічев С. В., Ішутіна Г. С., Трегуб О. В. ЛОГІКО-ЙМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДМОВ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ.....	33
Беліков А. С., Пилипенко О. В., Шаломов В. А., Саньков П. М., Тимченко П. О., Руденко В. П. АНАЛІЗ РУЙНУВАНЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНО-ПАЛИВНОГО ЦИКЛУ УКРАЇНИ ВНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ РФ.....	48
Беліков А. С., Тодоров О. П., Чумак Л. О., Харченко В. В. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕСТРУКЦІЇ ТА ГОРІННЯ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ.....	58
Березюк А. М., Ганник М. І., Мартиш О. П., Папірник Р. Б., Мартиш О. О. РОЗРОБКА КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ТРАВІЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В СИЛЬНОАГРЕСИВНИХ ГАРЯЧИХ СІРЧАНОКИСЛИХ РОЗЧИНАХ.....	68
Бондаренко О. І. ОСОБЛИВОСТІ АРХІТЕКТУРНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ	75
Воробйов В. В., Шило О. С. ПЕРЕТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ОЗЕЛЕНЕНИХ ТЕРИТОРІЙ МІСТА ДНІПРО В УМОВАХ ПОДАЛЬШОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕКЗОГЕННИХ, ЕНДОГЕННИХ ТА АНТРОПОГЕННИХ ФАКТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....	84
Ковальов В. В., Кравчуновська Т. С., Броневицький А. П., Заяць Є. І., Данилова Т. В., Косолапов А. Ф. УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО РЕДЕВЕЛОПМЕНТУ ПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ.....	102
Кононенко Г. Ю. МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ВІЗУАЛЬНИМИ ЯКОСТЯМИ ОСВІТЛЕННЯ ПУБЛІЧНИХ ПРОСТОРІВ МІСТА.....	117
Ландо Є. О., Андреева І. Г., Трегуб О. В., Степанцова О. Є. ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСВІДУ ФОРМУВАННЯ РИНКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ В ІНШИХ КРАЇНАХ.....	130
Самойленко Є. В., Сірик Б. Д. ФОРМУВАННЯ АРХІТЕКТУРНО-МІСТОБУДІВНОГО ПРОСТОРУ СТАРИЦЬ: НАУКОВИЙ ТА ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД.....	135
Ткачова В. В., Березюк Г. Г., Прокоф'єва Г. Я., Солод Л. В., Адегов О. В. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРУПОВОГО УРАХУВАННЯ АРГУМЕНТІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ГАЗУ НАСЕЛЕННЯМ.....	143
Доненко В. І., Бобраков А. А., Бейнер Н. В., Бейнер П. С., Чечель М. В., Іваненко Д. С. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛУ ЛОГІСТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЛАНЦЮГАМИ ПОСТАВОК В БУДІВНИЦТВІ.....	151

CONTENT

Bielikov A.S., Yalanskyi O.A., Barabanov S.S., Slashchova O.A., Ikonnikov M.Yu. DEVELOPMENT OF MODELS COMPLEX OSCILLATIONS FOR AUTOMATION SYSTEMS OF VIBROACOUSTIC OPERATIONAL SAFETY CONTROL OF BUILDINGS AND STRUCTURES.....	7
Balashova Yu.B., Demianenko V.V., Tregub O.V., Chepurna K.O., Balashov A.O. USE OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION OF ROAD PAVEMENTS.....	19
Biehichev S.V., Ishutina H.S., Tregub O.V. LOGICAL-PROBABLIC MODELING OF FAILURES OF GEODESIC NETWORKS.....	33
Bielikov A.S., Pylypenko O.V., Shalomov V.A., Sankov P.M., Tymchenko P.O., Rudenko V.P. ANALYSIS OF THE DESTRUCTION OF UKRAINIAN NUCLEAR FUEL CYCLE ENERGY FACILITIES AS A RESULT OF RUSSIAN MILITARY OPERATIONS	48
Bielikov A.S., Todorov O.P., Chumak L.O., Kharchenko V.V. SIMULATION THE PROCESSES OF ORGANIC MATERIALS DESTRUCTION AND COMBUSTION PROCESSES CONDITION OF FIRE INTENSEICATION.....	58
Berezyuk A.M., Hannyk M.I., Martysh O.P., Papirnyk R.B., Martysh O.O. DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE DESIGN OF PICKLING UNITS FOR OPERATION IN HIGHLY AGGRESSIVE HOT SULPHURIC ACID SOLUTIONS.....	68
Bondarenko O.I. FEATURES OF ARCHITECTURAL FORM FORMATION OF ENERGY-EFFICIENT MULTISTORY BUILDINGS.....	75
Vorobiov V.V., Shylo O.S. RECONSTRUCTION OF THE SYSTEM OF GREENING TERRITORIES OF THE DNIPRO AREA IN THE MINDS OF FURTHER TRANSFORMATIONS OF EXOGENIC, ENDOGENIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS OF THE OLD DEVELOPMENT.....	84
Kovalov V.V., Kravchunovska T.S., Bronevytskyi A.P., Zaiats Ye.I., Danylova T.V., Kosolapov A.F. IMPROVED DECISION-MAKING ALGORITHM FOR THE REDEVELOPMENT OF INDUSTRIAL AREAS.....	102
Kononenko H.Yu. METHODS FOR MANAGING VISUAL QUALITIES OF LIGHTING IN PUBLIC SPACES OF THE CITY.....	117
Lando Ye.O., Andreieva I.G., Tregub O.V., Stepantsova O.Yu. STUDYING THE EXPERIENCE OF FORMING AGRICULTURAL LAND MARKETS IN OTHER COUNTRIES.....	130
Samoilenko Ye.V., Siryk B.D. FORMATION OF THE ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING SPACE OF OXBOW LAKES: SCIENTIFIC AND PRACTICAL EXPERIENCE.....	135
Tkachova V.V., Bereziuk H.H., Prokofieva H.Ya., Solod L.V., Adehov O.V. APPLICATION OF THE METHOD OF GROUP ARGUMENTS ACCOUNTING FOR BUILDING MODELS OF SHORT-TERM FORECASTING OF GAS CONSUMPTION BY THE POPULATION.....	143
Donenko V.I., Bobrakov A.A., Beiner N.V., Beiner P.S., Chechel M.V., Ivanenko D.S. ANALYSIS OF THE FUNCTIONALITY OF LOGISTICS MANAGEMENT FOR EFFECTIVE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT IN CONSTRUCTION.....	151

УДК 622.8:331.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.7.1055

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

БЕЛІКОВ А. С.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
ЯЛАНСЬКИЙ О. А.², канд. техн. наук, доц.,
БАРАБАНОВ С. С.³, асп.,
СЛАЦОВА О. А.⁴, канд. техн. наук, с. н. с.,
ІКОННИКОВ М. Ю.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра електропривода, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

³ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁴ Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁵ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: ikonnikovm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2977-2007

Анотація. Постановка проблеми. Довготривала безпечна експлуатація будівель і споруд неможлива без визначення стійкості їх несних елементів, особливо після струсів і динамічних навантажень за впливу вибухів і пожеж. У таких умовах достовірний і продуктивний моніторинг надійності будівель і споруд стає найважливішим елементом підвищення безпеки людей. Віброакустика – ефективний і інформативний метод, який дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін та інших видів конструкцій. Однак для підвищення швидкості та якості визначення стану об'єктів потрібна максимальна автоматизація систем віброакустичного контролю. **Мета дослідження.** – підвищення продуктивності та достовірності віброакустичного контролю будівель і споруд шляхом автоматизації ударної дії із заданими параметрами на базі розробки динамічних моделей складних коливань. **Методика.** Аналітичні дослідження динамічних кінематичних моделей збуджувача механічних коливань, комп'ютерне моделювання, лабораторні випробування системи керування вібраційним збуджувачем. **Результати.** Розроблено моделі складних коливань, які дозволяють підвищити надійність та реалізувати нові закони керування, неможливі для класичних вібраційних систем та необхідні для систем автоматизованого віброакустичного контролю будівель та споруд і забезпечення безпеки їх експлуатації. Обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності у схемі обчислення за алгоритмом Jack W. Stenshaw в більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж із початковими значеннями коефіцієнтів для пристроїв керування вібраційними машинами з обмеженою обчислювальною продуктивністю. Це необхідно для створення виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного моніторингу тріщин та порушень однорідності несних конструкцій будівель і споруд. Збуджувач коливань апробований в лабораторних умовах. **Наукова новизна.** Розроблено нові методи й алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання полічастотних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів із заданими амплітудними та частотними характеристиками. **Практична значимість.** Розроблено збуджувач коливань для системи автоматизованого віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. Це дає необхідну і достатню базу для удосконалення методів оцінювання зміни структури середовища внаслідок прояву тріщин та порушення однорідності.

Ключові слова: моделі складних коливань; віброакустичний моніторинг; безпека будівель і споруд; автоматизація систем контролю

DEVELOPMENT OF MODELS COMPLEX OSCILLATIONS FOR AUTOMATION SYSTEMS OF VIBROACOUSTIC OPERATIONAL SAFETY CONTROL OF BUILDINGS AND STRUCTURES

BIELIKOV A.S.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
YALANSKYI O.A.², *Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BARABANOV S.S.³, *Postgrad. Stud.*,
SLASHCHOVA O.A.⁴, *Ph. D. (Tech.), Sen. Res.*,
IKONNIKOV M.Yu.⁵, *Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

³ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁴ Department of Mineral Mining at Great Depths, the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine, 2a, Simferopolska St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁵ Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: ikonnikovm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2977-2007

Abstract. Problem statement. Long-term safe operation of buildings and structures is impossible without determining the stability of their load-bearing elements, especially after shocks and dynamic loads under the influence of explosions and fires. In such conditions, reliable and productive monitoring of the reliability of buildings and structures is a critical element in increasing human safety. Vibroacoustic is an effective and informative method that allows for non-destructive assessment of the condition of concrete, reinforced concrete, brick, multi-layer walls and other types of structures. However, to increase the speed and quality of determining the state of objects, maximum automation of the vibroacoustic method is required. **Purpose of the study.** Increasing the productivity and reliability of vibroacoustic monitoring of buildings and structures by automating the impact action with specified parameters based on the development of dynamic models of complex oscillations. **Methods.** Analytical studies of dynamic and kinematic models of the exciter of mechanical vibrations, computer modeling, laboratory tests of the vibration generator control system. **Research results.** Models of complex oscillations have been developed to improve reliability and implement new control laws that are impossible for classical vibration systems and are necessary for automated vibroacoustic control of buildings and structures and ensure the safety of their operation. The use of reduced bit depth coefficients in the calculation scheme using the Jack W. Crenshaw algorithm is justified in a wider range of argument values than with initial coefficient values for controlling vibration systems with limited computational performance. This is necessary when creating executive bodies of modern systems for automated vibroacoustic monitoring of the cracks and violations of the homogeneity of load-bearing structures of buildings and structures. The oscillation exciter has been tested in laboratory conditions. **Scientific novelty.** New methods and algorithms for automatic control of vibration exciters have been developed to obtain polyfrequency oscillations, linear waves and wave fields with specified amplitude and frequency characteristics. **Practical significance.** An oscillation exciter has been developed for a system of automated vibroacoustic control of the buildings and structures operation safety. This provides a necessary and sufficient basis for improving methods for assessing changes in the environment as a result of the appearance of cracks and loss of homogeneity.

Keywords: *models of complex oscillations; vibroacoustic monitoring; safety of buildings and structures; automation of control systems*

Постановка проблеми. Актуальність оцінювання стану будівель і споруд, насамперед, пов'язана із застарілістю основних фондів, відсутністю своєчасного і якісного їх ремонту. Крім цих факторів на будівлі діють струси і динамічні навантаження під час вибухів і пожеж, що викликає накопичення внутрішніх

пошкоджень, значне руйнування матеріалів споруд і виникнення аварійних ситуацій.

У таких умовах достовірний і продуктивний моніторинг характеристик надійності та стійкості конструкцій будівель виявляється найважливішим елементом підвищення безпеки людей.

Для оцінювання стійкості у працях [1; 2] запропоновано застосовувати метод математичного моделювання, за допомогою якого можуть бути визначені сценарії зміни напружень у разі зміни умов, що впливають на стійкість об'єкта контролю. Разом із тим прогноз розвитку процесів руйнування вимагає якісного програмного забезпечення, великих обчислювальних витрат і наукоємного аналізу даних. У праці [3] позначено, що моніторинг просторових та тимчасових варіацій продуктів розпаду радону може допомогти відслідковувати зміни небезпечних руйнівних процесів, що дозволяє знизити ризики втрати стійкості об'єктів.

Вирішення питань безпеки пов'язане з частковою невизначеністю поведінки об'єкта контролю у певних умовах. Для подолання невизначеностей у працях [4; 5] запропоновано оперувати діапазонами значень параметрів, межі яких визначаються, зокрема, й аналітичними методами з урахуванням різних нечітких моделей. При цьому будь-які оцінки стійкості та безпеки об'єктів контролю мають базуватися на первинних даних, отриманих шляхом якісного та об'єктивного моніторингу.

Разом із тим, для моніторингу і діагностики стійкості споруд найкраще застосовувати геофізичні методи неруйнівного контролю, зокрема, віброакустичний [6]. Віброакустика – ефективний та інформативний метод, який апробований в різних умовах, дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін перекриттів та інших видів конструкцій.

Суть віброакустичного контролю полягає в аналізі сигналів акустичного відгуку контрольованого об'єкта на збурювальний вплив із метою оперативного визначення стану об'єкта. Віброакустичний контроль безпеки функціонування будівель і споруд дозволяє виконувати такі завдання:

- контролювати структуру, тріщинуватість у процесі їх експлуатації;

- контролювати структуру, тріщинуватість та міцність після обрушення окремих частин конструкції;

- контролювати допустиме навантаження частин конструкції після підсилення;

- визначати потенційні загрози та ідентифікувати ризики втрати стійкості після пожежі та вибухів.

Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень потрібна максимальна автоматизація віброакустичного методу. Для систем автоматизації необхідне розроблення нових моделей складних коливань

Тому питання забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням удосконалення віброакустичного методу актуальне та потребує подальших досліджень.

Мета дослідження – підвищення продуктивності та достовірності віброакустичного контролю будівель і споруд шляхом автоматизації ударної дії з заданими параметрами на базі розробки динамічних моделей складних коливань.

Результати досліджень. Механічні коливання – фізичне явище, один із характерних станів природних об'єктів, зокрема, масивів, а також спостерігається в роботі значної кількості механічних (наприклад, геотехнічних) та електромеханічних систем. Збудження коливань із заданими енергетичними, кінематичними, динамічними та геометричними параметрами становить основне завдання приводів (зокрема, електричних) вібраційних систем, які широко застосовуються в усіх галузях промисловості та в прикладних наукових дослідженнях (рис. 1).

У рамках вирішення питання безпеки експлуатації будівель і споруд, в тому числі гірничих виробок, вкрай важливі своєчасність та швидкість контролю об'єктів. У переважній більшості для віброакустичного контролю при збудженні механічних коливань використовуються удари, що проводяться вручну з різною інтенсивністю та амплітудою. Це негативно

впливає на якість одержуваних результатів. Зрозуміло, що необхідна автоматизація процесу збудження коливань, створення різних форм і амплітуди вібраційних впливів на контрольований об'єкт.

Автоматизацію і підвищення якості процесу контролю можна виконати з використанням, наприклад, привода з електричною машиною обертального руху, редуктором, передачею та механізмом перетворення обертального руху на коливальний (хитання, прямолінійний або пласко-паралельний рух, рис. 2). В різних

вібраційних системах комбінація ланок цього ланцюга передачі та перетворення руху може варіюватися. Електропривід або нерегульований, або регульований з низькою якістю керування і кількістю регульованих величин від однієї до трьох у деяких випадках. Такі системи привода мають низку суттєвих недоліків, серед яких: значна маса передачі та неможливість зміни параметрів коливань, характер яких визначається конструктивно кінематикою механізму перетворення руху.

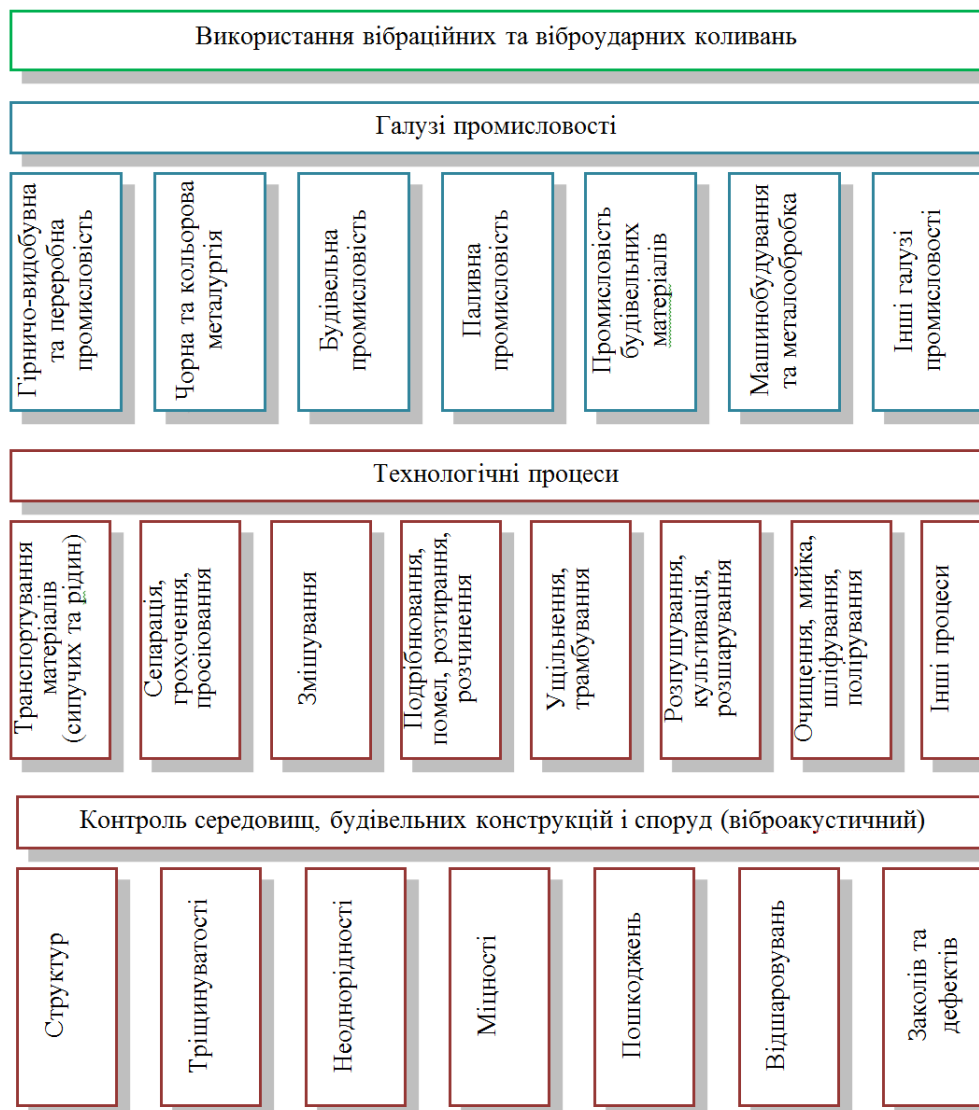


Рис. 1. Застосування вібраційних коливань у виробничій сфері та наукових дослідженнях

Отож, найслабшою ланкою виявляється саме цей механізм. Тому запропоновано прямий керований привід (генератор-збуджувач коливань), який дозволяє виключити цю ланку і не тільки позбутися зазначених недоліків, а й поліпшити

технологічні характеристики вібраційної системи, а також розширити сферу застосування такого привода.

Можливі такі способи застосування запропонованого генератора – збуджувача коливань:

- дослідження сейсмостійкості фізичних моделей будівель, промислових та гідротехнологічних споруд, їх окремих конструкцій та елементів (фундаментів, каркасів, арок, балок, стін, перекриттів тощо);

- дослідження лінійно-протяжних та висотних споруд, схильних до виникнення коливань, резонансів та розповсюдження хвиль (мостів, шляхопроводів, підвісних канатних та монорельсових доріг, трубопроводів, тунелів, стволів, виробок, висотних будівель, башт, елеваторів,

доменних печей, димових труб, градирень) тощо;

- генерація електричного задавального сигналу та збудження механічних коливань у мобільних комплексах віброакустичної сейсмозвідки, стаціонарних системах та в автономних приладах віброударного та віброакустичного контролю кріплення виробок, оздоблення тунелів, контролю навантаженості кріплення та взаємодії в системі «кріплення – породний масив», контролю стійкості будівель і споруд для забезпечення безпеки їх експлуатації.

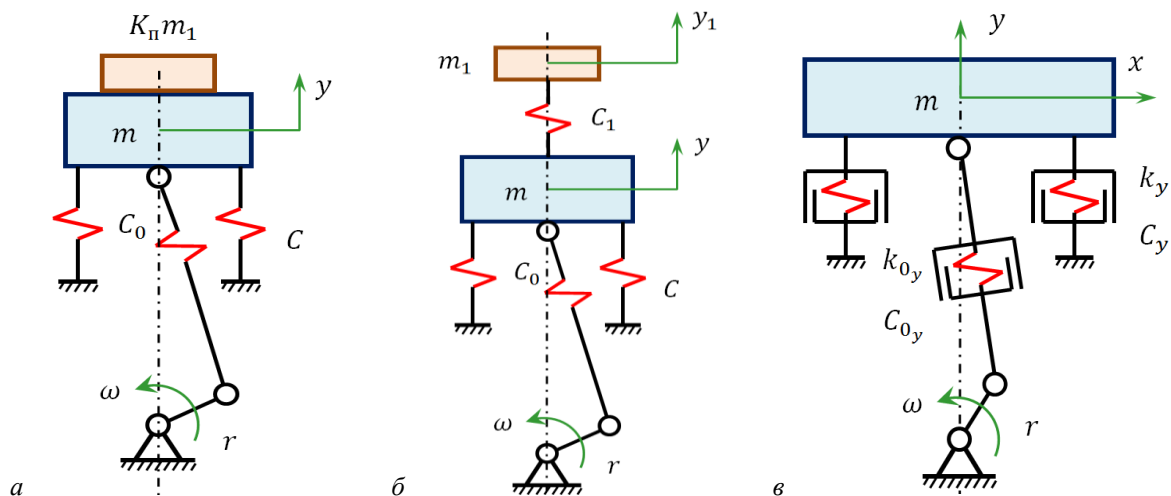


Рис. 2. Типові динамічні моделі збуджувача механічних коливань: а, б – з урахуванням технологічного навантаження; в – з нелінійним демпфером; C_y, C_{0y} – жорсткості вздовж осі y ; k_y, k_{0y} – коефіцієнти гістерезисних в'язких опорів

У загальному випадку це дослідження відгуку природних та штучних технічних об'єктів та їх масштабних плоских і просторових фізичних моделей на імпульсні, коливальні гармонічні і негармонічні та хаотичні збуджувальні впливи [7; 8], спостереження резонансних та інтерференційних явищ, а також розроблення методів та алгоритмів пасивної та/або активної корекції/компенсації за автоматизованого керування такими об'єктами.

Розглянемо типові динамічні моделі класичних вібраційних систем (рис. 2, а, б). Ці моделі є лінійними коливальними системами. Перша з них (рис. 2, а) враховує технологічне навантаження як приєднану масу m_1 з еквівалентним коефіцієнтом приєднання K_p до основної зведеної маси m . Друга модель (рис. 2, б) враховує пружні та

інерційні властивості технологічного навантаження. Диференційні рівняння руху цих систем запишемо як суперпозицію усіх сил, що прикладені до центрів мас:

$$(m + K_p m_1) \ddot{y} + C_y = C_0 r \sin \omega t, \quad (1)$$

$$\begin{cases} m \ddot{y} + C_y + C_1 (y - y_1) = C_0 r \sin \omega t, \\ m_1 \ddot{y}_1 + C_1 (y_1 - y) = 0. \end{cases}$$

де C – зведена жорсткість основних пружних зв'язків; C_0 – жорсткість пружних елементів; r – радіус ексцентриситету привода; ω – кутова швидкість обертання привода віброзбуджувача.

Амплітудні показники коливань робочого органа визначаються таким чином:

- без урахування технологічного навантаження:

$$A = p_0^2 r / (p^2 - \omega^2); \quad (2)$$

- з урахуванням технологічного навантаження, як приєднаної маси:

$$A = p_0^2 r / (p^2 - [1 + K_1 K] \omega^2); \quad (3)$$

- для системи, що враховує пружні та інерційні властивості технологічного навантаження у вигляді зосередженої маси та пружного елемента:

$$A_1 = \frac{p_0^2 r}{Km \omega^4} \left(1 - \frac{Km \omega^2}{C_1} \right) \times \left(C_1 - \left[\frac{KC}{C_1} + K + 1 \right] \omega^2 + p_1^2 \right), \quad (4)$$

де $p^2 = C/m$, $p_0^2 = C_0/m$, $p_1^2 = C_1/m$ – квадрати парціальних частот, $K = m_1/m_2$ – співвідношення маси технологічного навантаження до маси частин системи, що коливаються [9; 10].

Друга модель (рис. 2, б) точніше описує вплив навантаження на коливальні процеси в системі, оскільки, на відміну від першої, враховує характер взаємодії основної зведеної маси з масою навантаження як пружний зв'язок. Однак навантаження розглядається як зосереджена маса, що є значним припущенням для більшості технологічних процесів і вібраційних систем. Система рівнянь (1) описує рух центрів мас лише уздовж однієї осі. А лінійність системи зумовлює гармонічний характер коливань у ній. Подальше уточнення моделей може полягати в урахуванні розосередженого характеру навантаження та електромеханічної системи, опису коливань у просторі в трикоординатній системі відліку.

Ефективність роботи вібраційних систем визначається якістю збуджуваних коливань робочого органа установки. Тому необхідно виконати такі завдання:

- уточнення динамічних моделей існуючих вібраційних систем;
- розроблення нових кінематичних схем та механізмів для вібраційних систем;
- розроблення нових методів та алгоритмів автоматичного керування рухом вібраційних збуджувачів із метою отримання полічастотних та хаотичних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів

із заданими амплітудними та частотними характеристиками з дотриманням метрологічних вимог.

Для збудження полічастотних асиметричних коливань відомий ексцентриковий нелінійний пружно-в'язкий привід (рис. 2, в). Він спроектований на основі класичної кінематичної схеми ексцентрикового привода і складається з ексцентрикового вала, що встановлений на опорній рамі віброустановки, та прикріплених гумовими елементами до робочого органа шатунів. Нелінійний елемент передає на робочий орган змінні збуджувальні зусилля, які хаотизують коливання робочого органа і його навантаження, впливаючи як на частотні характеристики, так і на характер руху.

Проте очевидно, що напрям та величина збуджувальних зусиль (і, відповідно, характер коливань) визначаються конструкцією системи, її кінематичною схемою та конструктивним виконанням демпфера. Це не критично для вібраційної установки, яка вбудована в технологічний процес підприємства на усталеному виробництві, але неефективно у разі змінного навантаження і неприйнятно для стендів, апаратури контролю, наукового обладнання тощо.

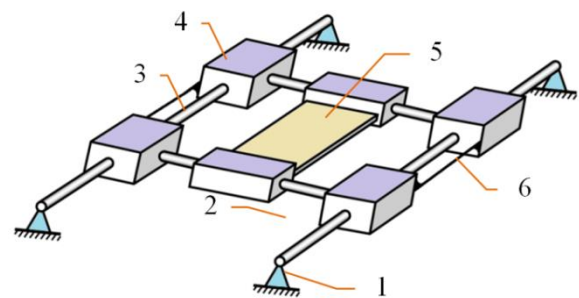


Рис. 3. Спрощена кінематична схема вібраційної системи з прямим лінійним приводом:
1 – станина; 2 – опора; 3 – напрямна; 4 – лінійний двигун або привідний механізм; 5 – рухома платформа; 6 – ланка жорсткості

Також механізми вібраційних систем з обертальним рухом привідної ланки, в яких робочий орган виконує лінійні зворотно-поступальні рухи, підлягають прямій заміні керованим лінійним електроприводом, хоча це рішення дороге й доцільне лише для лабораторно-діагностичного, медичного та іншого високотехнологічного обладнання

(рис. 3). Механізми вібраційних систем із коливальним рухом привідної ланки та лінійним зворотно-поступальним рухом робочого органа (як от механізми Ватта, Чебишова, Хойкена, Ліпкіна–Посельє) також можуть бути замінені керованим лінійним електроприводом.

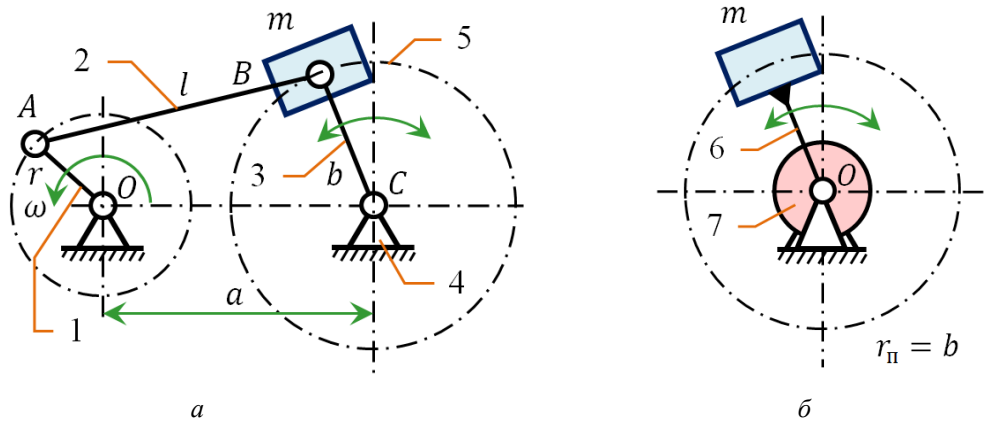


Рис. 4. Типові кінематичні схеми механізмів вібраційних систем, що підлягають прямій заміні на електропривід прямої дії: а – з обертальною ведучою ланкою; б – з прямим приводом. 1 – кривошип (корба) довжиною $|OA| = r$; 2 – гонок довжиною $|AB| = l$; 3 – балансір довжиною $|BC| = b$; 4 – станина з відстанню $|OC| = a$ між осями обертання; 5 – дугова напрямна радіусом b ; 6 – важіль; 7 – привід; O – центр осі обертання ведучої ланки

Під «рівнем керованості» маємо на увазі спроможність системи керування реалізувати заданий закон керування, який забезпечить необхідні швидкісні діаграми руху робочого органа. Для випадку вхідної (початкової) швидкісної діаграми робочий орган системи з прямим електроприводом має рухатися так само, як робочий орган системи-прототипк. При цьому необхідно розробити відповідний закон керування прямим електроприводом. У разі використання нових швидкісних діаграм є можливість отримання якісно нових властивостей для спеціалізованого обладнання (наприклад, отримання детерміновано-хаотичної траєкторії коливань для автоматизації віброакустичних досліджень без використання нелінійних механічних елементів).

Необхідний рівень керованості забезпечується достатньою обчислювальною потужністю цифрової системи керування, заданою точністю та динамічним діапазоном подання сигналів та величин, точністю вимірювань фізичних величин датчиками з урахуванням перетворювачів, достатньою пропускну

На рисунку 4 наведено кінематичні схеми механізмів вібраційних систем, що підлягають прямій заміні на керований електропривід за умови забезпечення динамічних характеристик та рівня керованості. Зокрема, таким є кривошипно-коромислова система (рис. 4, а).

спроможністю каналів даних, шин та інтерфейсів і, залежно від закону керування, наявністю зворотних зв'язків за координатами (положенням, швидкістю).

Система керування вібраційним збуджувачем у загальному випадку може складатися з підсистем людино-машинного інтерфейсу, програмованого логічного контролера, збору й обробки інформації. В разі необхідності система доповнюється підсистемою забезпечення безпеки і запобігання нештатних ситуацій.

Розглянемо для прикладу пряму заміну системи на рисунку 4, а керованим електроприводом прямої дії. Для реалізації прямим приводом таких самих швидкісних діаграм руху робочого органа, які були до модернізації, встановлюємо, що зв'язок між кутом φ_3 повороту балансира та кутом φ_1 повороту кривошипа визначається на основі співвідношень через розміри балансира і є передавальною функцією механізму:

$$\varphi_3 = \arctg \frac{r \sin \varphi_1}{r \cos \varphi_1 - a} + \arccos \frac{l^2 - b^2 - a^2 - r^2 + 2ar \cos \varphi_1}{2b \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \varphi_1}}. \quad (5)$$

Для визначення системою керування поточної кутової координати робочого органа в реальному часі за виразом (5) необхідно обрати алгоритми обчислення обернених тригонометричних функцій $\alpha = \arctg x$ та $\alpha = \arccos x$, де α – довільний кут, рад. Що важливо, алгоритми обов'язково повинні забезпечувати задану точність для роботи виконавчих органів пристроїв та швидкість обчислень.

У разі використання контролерів із високою обчислювальною продуктивністю доцільно застосовувати числові ІЕС-оператори (International Electrotechnical Commission, Міжнародна електротехнічна комісія) тригонометричних функцій. Програма користувача розробляється текстовими мовами програмування: мовою Структурованого Тексту (Structured Text, ST), мовою Списку Інструкцій (Instruction List, IL); або графічною мовою програмування, яка дозволяє вільно розташовувати програмні елементи та охоплювати їх зворотними зв'язками – мовою Безперервних Функціональних Схем (Continuous Function Chart, CFC).

Для мікроконтролерів загального призначення традиційно використовуємо мову програмування C++ з розробкою найбільш критичного обчислювального блока програми мовою Асемблера. Такий інструментарій надає зручні засоби розроблення програмних застосунків та забезпечує необхідну обчислювальну продуктивність і швидкодію системи, яка має працювати в режимі реального часу.

Найскладніший варіант – це розроблення та реалізація збуджувача коливальних на основі мікропроцесорної системи саме з обмеженими обчислювальними можливостями та апаратними ресурсами (наприклад, на основі одноплатної міні ЕОМ з однокристальним мікроконтролером або цифровим сигнальним процесором). У той же час цей варіант становить найбільший інтерес, тому що дозволяє отримати компактний автономний недорогий пристрій, що не вимагає ліцензійного системного програмного забезпечення. А досвід, отриманий у процесі розроблення

такого пристрою, може бути корисним у подальшому багатьом проектантам, що працюють у галузі створення компактних високотехнологічних пристроїв, наприклад, цифрових вимірювальних приладів, діагностичних комплексів, систем керування тощо.

Відомо, що значення тригонометричних функцій можна обчислити з використанням рядів Маклорена з будь-якою необхідною точністю, проте для апаратних засобів з обмеженою обчислювальною продуктивністю (до яких може бути віднесена апаратура віброакустичного контролю), існують алгоритми швидких обчислень.

Такими є алгоритми Jack W. Crenshaw [11], які дозволяють обчислювати, зокрема, деякі прямі та зворотні функції. За одним із них маємо:

$$\alpha = \frac{x(A + Bx^2)}{1 + Cx^2}, \quad (6)$$

де $A=0,9999990202289$, $B=0,2579776588114$, $C=0,5912045052131$ – коефіцієнти, що задаються як константи подвійної точності, причому $\alpha \leq 15^\circ$ з похибкою не більшою за 4×10^{-7} одиниць.

Існує ще одна реалізація цього алгоритму (Jack G. Ganssle):

$$\alpha = \frac{x(k_1 + k_2x^2)}{k_3 + x^2}, \quad (7)$$

де $k_1=1,6867629106$, $k_2=0,4378497304$, $k_3=1,6867633134$, причому $\alpha \leq 15^\circ$.

Для більшості реальних практичних застосунків (у технічних системах) така точність надмірна та ресурсномістка. Тому виконано дослідження впливу розрядності перелічених коефіцієнтів на значення абсолютної похибки $\Delta\alpha$ обчислення кута α за допомогою алгоритмів Jack W. Crenshaw (рис. 5).

Для співставлення значень похибок обчислення кута α з початковими значеннями коефіцієнтів (графік 2, рис. 5) та з коефіцієнтами зменшеної до двох десяткових знаків розрядності (графік 3, рис. 5). Отримано абсолютні похибки (графік 4) та різниці їх модулів (графік 5).

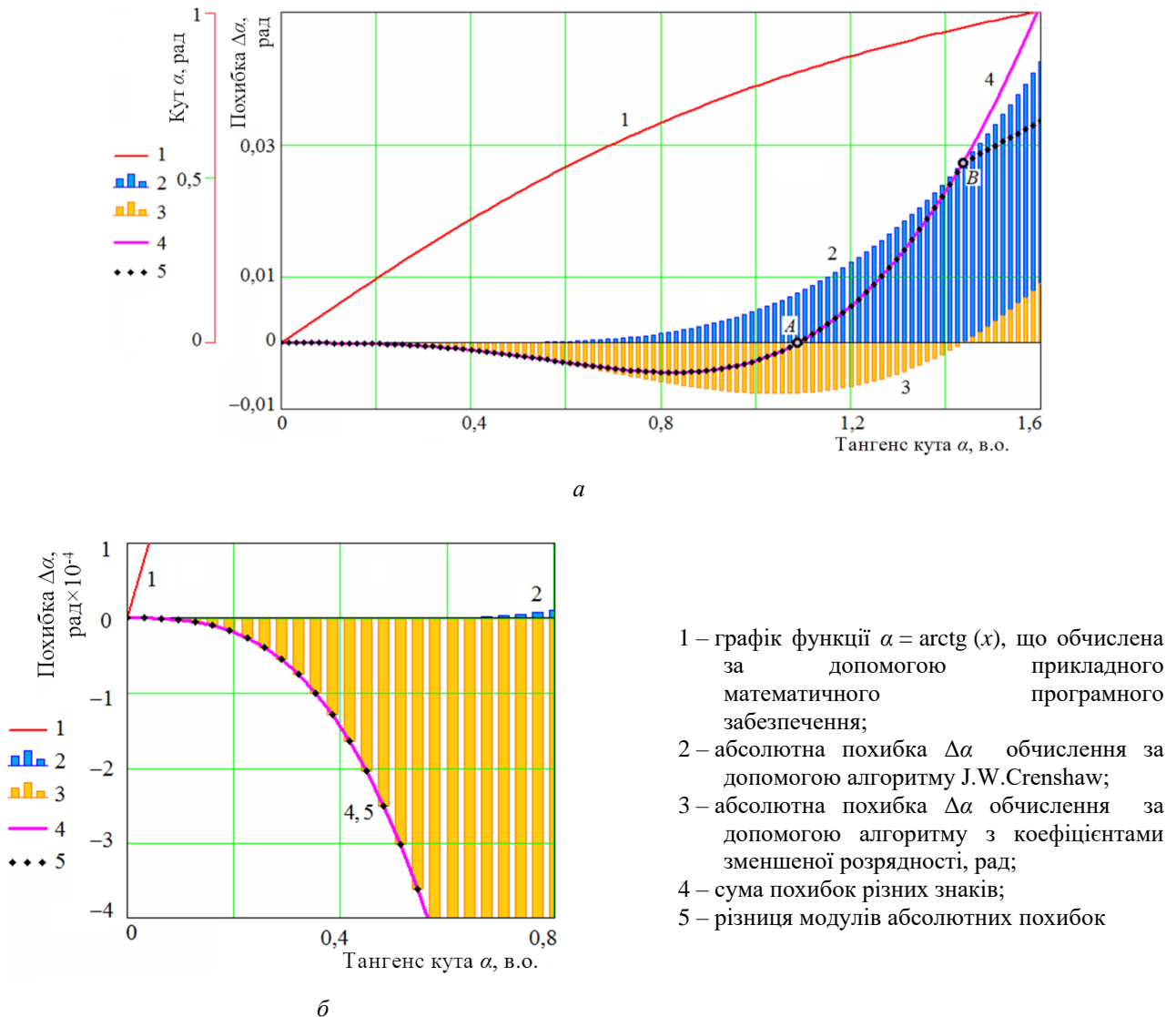


Рис. 5. Аналіз алгоритмів обчислення похибок для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю: а – абсолютні похибки (діапазон 0...1,6 в.о.) графіки функції, б – порівняння результатів абсолютних похибок (діапазон 0...0,8 в.о.)

Як можна побачити, до значення аргументу $\text{tga} = 1,07$ (т. А на осі абсцис) обчислення кута α з початковими значеннями коефіцієнтів дає меншу абсолютну похибку, аніж обчислення з коефіцієнтами зменшеної розрядності, але її значення при цьому не перевищує 0,01 рад, що задовольняє вимогам для використання в будь-яких технічних системах, окрім деяких метрологічних та науково-дослідницьких (для яких формулюються жорсткі вимоги і питання точності обчислень потребує додаткових досліджень).

За більших значень аргументу обчислення з коефіцієнтами меншої розрядності забезпечує навіть більшу

точність визначення кута. При значенні аргументу $\text{tga} = 1,45$ (т. В на рис. 5, а) абсолютна похибка обчислень із коефіцієнтами зменшеної розрядності змінює знак. Таким чином, в околиці цієї точки маємо найбільшу точність визначення кута. В подальшому при збільшенні аргументу абсолютні похибки визначення кута α зростають і з використанням початкових значень коефіцієнтів і з коефіцієнтами зменшеної розрядності, що обмежує область визначення (на осі аргументу).

Отже, обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності у схемі обчислення за алгоритмом Jack W. Crenshaw

у більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж із початковими значеннями коефіцієнтів у технічних системах керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю. Це необхідно для створення виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного

моніторингу структури, тріщин та порушень однорідності несних конструкцій будівель і споруд.

Апробація розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю проведена в лабораторних умовах (рис. 6).



Рис. 6. Апробація розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю в лабораторних умовах

Процес розроблення збуджувача коливань включає: вибір системи рівнянь, що описують коливання; визначення діапазонів зміни параметрів; вибір конкретних значень параметрів для реалізації; проведення кореляційного аналізу вихідних сигналів при заданих параметрах із метою визначення якості; визначення амплітудних діапазонів зміни вихідних величин і окремих компонентів рівнянь; складання раціональної обчислювальної схеми розв'язання рівнянь; алгоритмізацію обчислювальної схеми.

Після цього виконується програмування, налагодження та оптимізація програми. Слід зазначити, що наведена вище схема не є строго лінійною,

тому виконання будь-якого з етапів може повторюватися.

Висновки.

1. Розроблено моделі складних коливань, які дозволяють підвищити достовірність контролю і реалізувати нові закони керування, неможливі для класичних вібраційних систем, але необхідні для систем автоматизованого віброакустичного контролю будівель та споруд.

2. Обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності в схемі обчислення за алгоритмом Jack W. Crenshaw у більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж із початковими значеннями коефіцієнтів для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною

продуктивністю. Це необхідно для створення виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного моніторингу тріщин та порушень однорідності несних конструкцій будівель і споруд.

3. Розроблено нові методи й алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання полічастотних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів із заданими амплітудними та частотними

характеристиками. Це дає необхідну і достатню базу для удосконалення оцінки зміни структури середовища внаслідок прояву тріщин та порушення однорідності за допомогою віброакустичного моніторингу.

4. Розроблено та апробовано в лабораторних умовах збуджувач коливань для системи автоматизованого віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Slashchov A., Slashchov I., Siromaschenko I., Kurinnyi V., Ikonnikov M. Development of digital technologies for the systems of remote mining safety monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 168. Pp. 00065.
2. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I., Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Pp. 012010.
3. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A., Slashchova O. Forecast of the mine workings destruction risks by the radiometric control method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1156. Pp. 012033.
4. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V., Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1156. Pp. 012015.
5. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources : 3rd International Sci. and Tech. Conf. Book of Abstracts*. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.
6. Булат А. Ф., Усаченко Б. М., Яланський А. А. та ін. Методичний посібник з комплексної геофізичної діагностики породного масиву та підземних геотехнічних систем. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2004. 75 с.
7. Яланський А. А., Слашов І. М., Яланський Ал. А., Іконнікова Н. А., Цикра А. А. Оцінка хаотичності процесів, що відбуваються в гірничих технічних системах, особливості управління та використання. *Геотехнічна механіка*. Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2010. № 91. С. 159–172.
8. Kesheng Wu, Kiang Zhang. Global dynamics of the generalized Lorenz systems having invariant algebraic surfaces. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2013. Vol. 244 (1). Pp. 25–35.
9. Франчук В. П., Анциферов О. В., Дуганець В. І. Зусилля у приводі вертикального млина. *Геотехнічна механіка*. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2016. № 131. С. 100–107.
10. Франчук В. П. Принципи приведення технологічного навантаження до системи з дискретними параметрами. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011. № 4 (64). С. 5–11.
11. Crenshaw Jack Math Toolkit for Real-Time Development. Taylor & Francis. 2000. 466 p.

REFERENCES

1. Slashchov A., Slashchov I., Siromaschenko I., Kurinnyi V. and Ikonnikov M. Development of digital technologies for the systems of remote mining safety monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 168, pp. 00065. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800065>
2. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 970, pp. 012010. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>
3. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecast of the mine workings destruction risks by the radiometric control method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023, vol. 1156, pp. 012033. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012033>
4. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V. and Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2023, vol. 1156, pp. 012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012015>
5. Slashchova O.A., Yalanskyi O.A. and Slashchov A.I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative Development of Resource-saving Technologies and Sustainable Use of Natural Ources : 3rd International Sc. and Tech. Conf. Book of Abstracts*. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020, pp. 126–127. URL: <https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/1>.

6. Bulat A.F., Usachenko B.M., Yalanskyi A.A. and oth. *Metodychnyy posibnyk z kompleksnoyi heofizychnoyi diahnostyky porodnoho masyvu ta pidzemnykh heotekhnichnykh system* [Methodical manual for complex geophysical diagnostics of the rock massif and underground geotechnical systems]. Dnipro : IGTM NASU Publ., 2004, 75 p. (in Ukrainian). URL: <https://nvd-nanu.org.ua/afafbfbab-79d0-4e01-5f32-3cca4fd32f49/>

7. Yalansky A.A., Slashchev I.N., Yalansky Alex.A., Ikonnikova N.A. and Tsikra A.A. *Otsinka khaotychnosti protsesiv, shcho vidbuvayut'sya v hirnychkykh tekhnichnykh systemakh, osoblyvosti upravlinnya ta vykorystannya* [Assessment of the chaotic nature of the processes occurring in mining technical systems, features of management and use]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2010, no. 91, pp. 159–172. (in Ukrainian). URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/33532>

8. Kesheng Wu and Kiang Zhang. Global dynamics of the generalized Lorenz systems having invariant algebraic surfaces. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2013, vol. 244 (1), pp. 25–35. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physd.2012.10.011>

9. Franchuk V.P., Antsyferov O.V. and Duhanets V.I. *Zusylyya u pryvodi vertykal'noho mlyna* [The drive force in the vertical vibratory mill]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2016, no. 131, pp. 100–107. (in Ukrainian). URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/138766>

10. Franchuk V.P. *Pryntsypy pryvedennya tekhnolohichnoho navantazhennya do systemy z dyskretnymy parametramy* [Principles of bringing technological load to a system with discrete parameters]. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Vibrations in Engineering and Technology]. 2011, no. 4 (64), pp. 5–11. (in Ukrainian). URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/3459>

11. Crenshaw Jack *Math Toolkit for Real-Time Development*. Taylor & Francis. 2000, 466 p. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=YEyxJyEam0YC>

Надійшла до редакції: 12.04.2024.

УДК 625.7/8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.19.1056

ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У БУДІВНИЦТВІ ПОКРИТТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

БАЛАШОВА Ю. Б.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ДЕМ'ЯНЕНКО В. В.², канд. техн. наук, доц.,
ТРЕГУБ О. В.³, канд. техн. наук, доц.,
ЧЕПУРНА К. О.⁴, студ.,
БАЛАШОВ А. О.⁵, студ.

^{1*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 786-54-46, e-mail: balashova.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

² Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 728-38-94, e-mail: demianenko.viktor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0427-4263

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 439-16-34, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

⁴ Будівельний факультет, кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 567-10-12, e-mail: kara.naw.law.2004@gmail.com

⁵ Будівельний факультет, кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 678-37-54, e-mail: andbalashov@hotmail.com, ORCID ID: 0009-0007-5833-0888

Анотація. Постановка проблеми. Україна, прямуючи до європейської інтеграції, стоїть перед викликом не лише вступити до Європейського союзу, а й адаптувати свою інфраструктуру до високих європейських стандартів якості. Після закінчення війни необхідно не лише відбудувати зруйновані автомобільні дороги, аеродроми та споруди, а й гарантувати стійкість та довговічність інфраструктурних об'єктів. Одна з ключових галузей, де інновації можуть мати суттєве значення, – це дорожнє будівництво. Асфальт і бетон – найпоширеніші будівельні матеріали у сфері будівництва нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу. Інноваційні технології ремонту тріщин у покриттях автомобільних доріг з асфальту і бетону постійно розвиваються. Тривають пошуки нових методів і матеріалів для більш ефективного та тривалого утримання дорожнього покриття в належному стані. Використання передових технологій дозволяє підвищити якість ремонту, збільшити тривалість служби доріг і зменшити його вплив на навколишнє середовище. Інноваційні підходи до ліквідації тріщин допомагають забезпечити безпеку і комфорт на дорозі для всіх учасників дорожнього руху. **Мета статті** – аналіз зарубіжного досвіду застосування ефективних інноваційних технологій у будівництві покриттів автомобільних доріг та обґрунтування доцільності використання самовідновлюваного верхнього шару нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу з асфальту і бетону в умовах України на основі аналізу їх властивостей. **Висновки.** Включення властивостей самовідновлення в асфальто-бетонні покриття – ефективний метод для збільшення терміну їх служби та досягнення екологічності дорожнього одягу. Досліджені наявні та вдосконалені технології самовідновлення, придатні для застосування в асфальтових покриттях, а саме, включення загоювальних речовин, індукційне нагрівання та гібридні технології. Досліджено механізми самовідновлення бетону: аутогенні, на основі автономних бактерій і на основі автономних капсул. Дослідження самовідновлюваних покриттів спрямовані на розроблення розумної та ефективної системи дорожнього одягу, здатної до самооцінки та автоматизованого ремонту тріщин. Вибір технології повинен базуватися на її здатності ефективно відновлювати пошкодження та тріщини в асфальті і бетоні, забезпечуючи тривалий та надійний захист.

Ключові слова: інноваційні технології; покриття автомобільних доріг; нежорсткий і жорсткий дорожній одяг; тріщини; самовідновлюваний асфальт; самовідновлюваний бетон

USE OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION OF ROAD PAVEMENTS

BALASHOVA Yu.B.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

DEMIANENKO V.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TREGUB O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
CHEPURNA K.O.⁴, *Stud.*,
BALASHOV A.O.⁵, *Stud.*

^{1*} Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 786-54-46, e-mail: balashova.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

² Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 728-38-94, e-mail: demianenko.viktor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0427-4263

³ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 439-16-34, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

⁴ Faculty of Civil Engineering, Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 567-10-12, e-mail: kara.naw.law.2004@gmail.com

⁵ Faculty of Civil Engineering, Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 678-37-54, e-mail: andbalashov@hotmail.com, ORCID ID: 0009-0007-5833-0888

Abstract. Problem statement. Ukraine, on its way to European integration, faces the challenge not only of joining the European Union, but also of adapting its infrastructure to high European quality standards. After the end of the war, it is necessary not only to rebuild the destroyed roads, aerodromes and buildings, but also to guarantee the sustainability and durability of infrastructure facilities. One of the key industries where innovations can make a significant difference is road construction. Asphalt and concrete are the most common building materials in the construction of flexible and rigid pavements. Innovative technologies for repairing cracks in asphalt and concrete road pavements are constantly evolving. New methods and materials are being sought for more efficient and long-term maintenance of the road surface. The use of advanced technologies allows us to improve the quality of repairs, extend the service life of roads and reduce their environmental impact. Innovative approaches to crack repair help to ensure safety and comfort on the road for all road users. *The purpose of the article* is to analyze foreign experience in the application of effective innovative technologies in the construction of road pavements and to substantiate the feasibility of using a self-healing top layer of flexible and rigid asphalt and concrete pavements in Ukraine based on the analysis of their properties. **Conclusions.** The inclusion of self-healing properties in asphalt concrete pavements is an effective method for increasing their service life and achieving environmental friendliness of pavements. Existing and advanced self-healing technologies suitable for use in asphalt pavements, namely, the inclusion of healing agents, induction heating, and hybrid technologies, have been investigated. The mechanisms of self-healing of concrete have been studied: autogenous, based on autonomous bacteria, and based on autonomous capsules. Research on self-healing pavements is aimed at developing a smart and efficient pavement system capable of self-assessment and automated crack repair. The choice of technology should be based on its ability to effectively repair damage and cracks in asphalt and concrete, providing long-term and reliable protection.

Keywords: *innovative technologies; road pavement; flexible and rigid pavement; cracks; self-healing asphalt; self-healing concrete*

Постановка проблеми. Україна, прямуючи до європейської інтеграції, стоїть перед викликом не лише вступити до Європейського союзу, а й адаптувати свою інфраструктуру до високих європейських стандартів якості. Після закінчення війни необхідно не лише відбудувати зруйновані автомобільні дороги, аеродроми та споруди, а й гарантувати стійкість та довговічність інфраструктурних об'єктів [1]. Одна з ключових галузей, де інновації можуть мати суттєве значення, – це дорожнє будівництво.

Асфальт і бетон – найпоширеніші будівельні матеріали у сфері будівництва нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу. Асфальт широко використовується для нежорсткого покриття доріг завдяки своїй здатності зменшувати шум від руху автотранспорту, високій стійкості до зношування та можливості повторного використання. Бетон застосовується для жорстких покриттів автомобільних доріг, а також як матеріал для дорожніх конструкцій, таких як огороження тунелів, підпірні стінки та балки, тунелі. Таким

чином, асфальт і бетон складають основну частину матеріалів, які використовуються у дорожньому будівництві. Внаслідок цього інноваційні технології ремонту тріщин у покриттях автомобільних доріг з асфальту і бетону постійно розвиваються. Застосування передових технологій дозволяє підвищити якість ремонту, збільшити тривалість служби доріг і зменшити його вплив на навколишнє середовище.

Аналіз публікацій. Одним із перспективних напрямків уже декілька десятиліть вважається застосування геосинтетичних матеріалів у конструкціях земляного полотна і покриттів автомобільних доріг для підвищення їх несучої здатності і довговічності [2]. Але постійний прогрес розвитку технологій спонукає до пошуку нових інноваційних рішень:

1. *Дороги з переробленого пластику.* У 2002 році професор хімії Інженерного коледжу м. Мадурай, Раджагопалан Васудеван (Rajagopalan Vasudevan) розробив технологію створення доріг із використанням пластику. Він запатентував метод перетворення звичайного сміття на добавку для бітуму. Додавання такої суміші дозволяє скоротити використання бітуму до 10 % [3].



Рис. 1. Використання пластикових відходів як добавки до бітуму

Інженер Тобі Маккартні (Toby McCartney) і його компанія, MacRebur, заснована в Шотландії, виробляє матеріали для будівництва доріг, які на 60 % міцніші за звичайний асфальт та мають термін експлуатації в 10 разів довший. Він

переробляє 100 % вторинний пластик на так звані гранули MR6, які замінюють бітум [4].

У ДП «ДерждорНДІ» проведено дослідження щодо використання добавок для модифікації бітумних в'язучих, отриманих із перероблених пластикових пляшок. Установлено, що асфальтобетон, виготовлений з використанням бітуму з такими добавками, виявляє значно кращі властивості порівняно з класичним асфальтобетоном [5].

2. *Збірні пластикові дороги.* Покриття доріг складається з модульних пластикових конструкцій, виготовлених із відходів переробленого пластику. У Нідерландах, у містах Зволле та Гітхорн, вже існують велосипедні доріжки, виконані тільки з пластикових відходів. Ця ідея відома як концепція PlasticRoad. Оцінюється, що термін експлуатації таких доріг збільшиться утричі порівняно з традиційними [6].



Рис. 2. Дороги із збірних пластикових панелей

У ПДАБА проведено дослідження щодо можливості використання для матеріалу дорожніх покриттів найбільш розповсюдженого в світі пластику – ПЕТ (поліетилентерефталат) та пластику з більш високими характеристиками щодо міцності – ПТФЕ (політетрафторетилен) [7]. У ході досліджень запроєктовано й оптимізовано модель збірного полімерного покриття для доріг із поліетилентерефталату (ПЕТ), яка має параметри, що забезпечують її надійне і довговічне функціонування в складних природних умовах, а також зручність в її подальшій експлуатації [8].

3. *Дороги зі світловідбивальними смугами (Light-Emitting Roads).* У Нідерландах на дорогах вуличні ліхтарі

замінені світловідбивальними смугами, які світяться в темряві, допомагаючи водіям зорієнтуватися. Це просте, але ефективно нововведення розробив дизайнер Даан Рузегарде. Протягом дня ці фосфоресцентні смуги поглинають сонячне світло і випромінюють його уночі [9].



Рис. 3. Дороги зі світловідбивальними смугами

4. *Електрифіковані дороги (Electrified Roads)*. Електрифікація усіх легкових автомобілів за допомогою відновлюваних джерел енергії з нульовим викидом вуглецю може суттєво зменшити викиди. Однак наразі серйозною проблемою для електромобілів став час заряджання. Проте ведуться дослідження щодо електрифікованих транспортних маршрутів, які дозволять водіям електромобілів заряджатися під час руху. Деякі розробки базуються на бездротовій зарядці, інші – на зарядці через контактний кабель, подібно до системи Scalextric у реальному масштабі, де автомобіль заряджається, маючи контакт із зарядною котушкою на дорозі [10].



Рис. 4. Електрифікована смуга руху на автомобільній дорозі

5. *Сонячні дороги (Solar Roadways)*. Основна мета Solar Roadways – виробляти чисту відновлювану енергію на дорогах та

інших поверхнях, по яких можна ходити або їздити. Концепція Solar Roadways піднімає сонячні технології на новий рівень. Її суть полягає в тому, щоб ефективно зібрати значну кількість сонячної енергії, яка падає на ці поверхні. Таким чином, вони матимуть подвійне призначення: сучасна інфраструктура плюс розумна електромережа.



Рис. 5. Сонячні дороги (Solar Roadways)

Розрахунки показують, що якби всі дорожні покриття та пішохідні доріжки у США були обладнані панелями Solar Roadway, вони могли б виробляти утричі більше електроенергії, ніж споживається у Сполучених Штатах [11].

6. *Дороги з магнітного бетону*. Швейцарська компанія Holcim у співпраці з баварським стартапом Magment працює над удосконаленням властивостей намагніченого бетону для дорожніх покриттів, що дозволить заряджати електромобілі під час руху. Це конкретне рішення відоме як «індуктивна зарядка». Технологія стала можливою завдяки бетону з високою магнітною проникністю, який можна використовувати як дорожнє покриття, на якому буде можливо безконтактно заряджати електромобілі [12].

7. *Дороги з водопоглинальних матеріалів*. Британська компанія Lafarge Tarmac упроваджує інноваційне дорожнє покриття Tormix Permeable. Верхній шар Tormix Permeable складається з великих фракцій щебеню, а вільний простір між цими фракціями дозволяє воді вільно стікати вниз. Пропускна здатність Tormix Permeable залежить від кількості вбудованих у покриття дренажних стоків: чим їх більше, тим ефективніше стікає вода з поверхні.

Завдяки пористій структурі покриття може швидко пропускати величезну кількість води – до 4 000 літрів за хвилину [13].



Рис. 6. Дорожнє покриття Gortmix Permeable

8. *Дороги із самовідновлюваного асфальтового покриття (Self-healing asphalt pavements)*. Всесвітній економічний форум визнає технологію самовідновлюваних матеріалів однією з 10 кращих нових технологій. До цього часу вона була вивчена на практиці головним чином в аерокосмічній промисловості, але дослідники активно працюють над її застосуванням у будівельній галузі.

Дослідники з Дельфтського технічного університету розробили самовідновлюване асфальтове покриття зі сталевими волокнами. Розтріскане покриття здатне самовідновлюватися за впливу сонячного світла або індукційного нагріву. Сталеві волокна в покритті забезпечують електропровідність. За впливу магніту асфальт і волокна в його складі нагріваються, тим самим дрібні тріщини на дорозі затягуються, що дає змогу звести дорожні роботи до мінімуму.

Щоб провести ремонт такої дороги, не потрібно перекривати її частину на кілька днів і замінювати покриття – достатньо прогнати по ній електромагнітну машину. Це може не просто вирішити проблему заторів, скоротити кількість аварій, а й дає змогу значно заощадити на ремонтних роботах.

Безумовно, поки що це дещо дорожче за традиційне дорожнє покриття. За підрахунками керівника дослідження Еріка Шлангена, інноваційне асфальтове покриття обходиться на 25 % дорожче, але термін служби дороги збільшиться вдвічі і дасть

змогу щорічно економити до 90 млн євро на рік [14].

9. *Дороги із самовідновлюваних бетонів (Self-Healing Concrete Roads)*. У 2013 році вчені з Університету Бата в Кардіффі та Кембриджу спільно розробили «розумний» бетон нового покоління та інші будівельні матеріали на основі цементу. У рамках проекту вони розробляють бетонну суміш, яка містить мікроінкапсульовані бактерії, що активізуються при проникненні води в тріщини бетону. Відбувається утворення вапняку (кальциту), який заповнює тріщини та ущільнює їх, перешкоджаючи проникненню води та кисню, що може спричинити корозію арматури. Використання самовідновлюваного бетону дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування [15].

Дослідники з Вустерського політехнічного інституту (WPI) використовують фермент, що міститься в еритроцитах, для створення самовідновлюваного бетону, який в чотири рази міцніший за традиційний бетон. Цей матеріал може подовжити термін служби конструкцій на основі бетону та уникнути необхідності дорогого ремонту або заміни. Застосований фермент автоматично реагує з атмосферним вуглекислим газом (CO_2), утворюючи кристали карбонату кальцію, які мають структуру, міцність та інші властивості, схожі на бетон. Крім того, ці кристали можуть заповнювати тріщини, подовжуючи термін служби конструкцій [16].

Мета статті – аналіз зарубіжного досвіду застосування ефективних інноваційних технологій у будівництві покриттів автомобільних доріг та обґрунтування доцільності використання самовідновлювального верхнього шару нежорсткого і жорсткого дорожнього одягу з асфальту і бетону в умовах України на основі аналізу їх властивостей.

Результати досліджень. Тріщини в асфальтовому і бетонному покриттях автомобільних доріг, а також у конструкціях і спорудах – це традиційна проблема в дорожньому будівництві, досі не розв'язана

досконально. Тріщини, зокрема крихітні, є практично на всіх спорудах автомагістралей різної протяжності [17, 18]. Тріщини на дорогах викликають різноманітні проблеми в їх конструкціях. Вони можуть з'являтися як у дорожньому покритті (асфальті або бетоні), так і в окремих конструктивних елементах, таких як бетонні балки мостів або облицювання тунелів. Для покриттів доріг розтріскування погіршує термін служби і комфорт водіння.

Проте для структурних елементів тріщини становлять більш серйозну загрозу. У випадку виходу з ладу ключових компонентів, таких як колони мостів, можуть мати місце катастрофічні наслідки.

Покриття автомобільних доріг просто несуть навантаження від транспортних засобів, тоді як для структурних елементів мостів важливо враховувати як навантаження транспортних засобів, так і вагу матеріалу. У тунелях, крім цих навантажень, конструкція облицювання зазнає впливу тиску гірських порід і гідравлічної ерозії. Складність гірського тиску в геотехнічних середовищах іноді непередбачувана, і гідравлічну ерозію важко контролювати. Ці тріщини мають бути оброблені, щоб уникнути подальших небезпек. Деякі типові форми тріщинних катастроф, що існують на автомагістралях, показано на рисунку 7 [19].

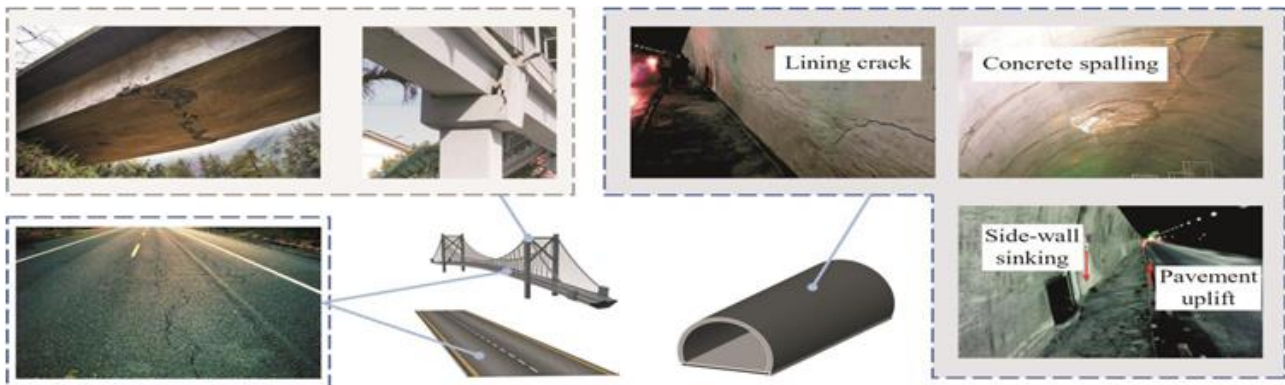


Рис. 7. Типові форми пошкодження тріщинами на автомагістралях [19]

Багато країн витратили величезні суми на підтримку та ремонт своєї інфраструктури. У США утримання автомагістралей через корозію обходиться приблизно в 4 млрд доларів, в Австралії – майже в 550 млн доларів за рік. У 2019 році Китай заплатив 37,18 млрд юань на утримання доріг. Підраховано, що собівартість виробництва бетону коливається від \$ 65/м³ до \$ 80/м³, тоді як ремонт тріщин і обслуговування конструкцій коштують приблизно 147 доларів США/м³. Довговічність відремонтованих конструкцій залишається серйозною проблемою: через 5 років, 20 % цих споруд виходять з ладу, а через 10 років – приблизно 55 %.

Основним методом ремонту тріщин на сьогоднішній день стало заповнення видимих тріщин цементним розчином або асфальтобетонними матеріалами. Проте цей

метод має дві основні проблеми: по-перше, експлуатаційні характеристики конструкції можуть відновитися лише до певного рівня первісної конструкції, що спричиняє повторне утворення тріщин у випадку, якщо зовнішнє середовище та навантаження залишаться незмінними; і, по-друге, такий метод дозволяє відремонтувати лише видимі тріщини на поверхні, тоді як внутрішні та мікротріщини в конструкціях можуть залишатися непоміченими.

Щоб запобігти подальшій концентрації напружень, компенсувати певний ступінь розтягувального напруження та запобігти подальшому розширенню тріщин, їх ремонт треба проводити своєчасно.

Асфальт і бетон становлять переважну більшість усіх матеріалів, що використовуються в дорожніх покриттях і конструкціях на автомагістралях. Тому технологія ремонту тріщин в основному

спрямована на асфальт і бетон у дорожньому будівництві. Завдяки досягненням у галузі багатофункціональних матеріалів, багато досліджень були зосереджені на тому, як запобігти розтріскуванню будівельних матеріалів, таких як асфальт і бетон, за комплексного впливу сили, температури та проникнення води [20].

Традиційний підхід полягає у вбудовуванні певних армувальних компонентів, таких як волокна або специфічні сполуки, у бетон або асфальт з метою поліпшення їх здатності запобігати утворенню тріщин. Інший метод, відомий як самовідновлення, передбачає включення в будівельні матеріали речовин, що можуть самостійно «зцілювати» мікропошкодження, тим самим забезпечуючи нові рішення для тривалого запобігання утворенню тріщин [21].

Своєчасне технічне обслуговування і відновлення обов'язкові для забезпечення того, щоб асфальтові покриття могли служити транспорту протягом усього їх проектного терміну експлуатації. Однак постійне виробництво і використання асфальтобетонних сумішей не лише стає нерентабельним, а й сприяє викидам значної кількості парникових газів. Тому були розроблені різні технології для внутрішнього виправлення дефектів до того, як вони стають помітними, із використанням різноманітних методів відновлення, відомих як технології самовідновлення.

Самовідновлення у дорожніх покриттях може бути досягнуте за допомогою використання загоювальних речовин, індукційного нагріву, мікрохвильового нагріву та інших технологій відновлення, де використовуються різноманітні наноматеріали і полімери як самовідновлювані добавки в асфальті.

Дослідження показують, що додавання самовідновлюваних добавок до асфальту може ефективно усунути мікротріщини, що утворилися, та значно продовжити термін служби. Тому дослідження лікувальних властивостей асфальту стали пріоритетним

напрямком ще з 1960-х років. Незважаючи на те, що асфальт сам по собі є матеріалом із деякими самовідновлюваними властивостями, цих властивостей недостатньо для ефективного ремонту мікротріщин. Отож, дослідження з посилення властивостей самовідновлення асфальту за допомогою зовнішніх методів зазнали значного прогресу протягом останнього десятиліття.

Проте ця галузь проектування та обслуговування дорожніх покриттів залишається досить мало вивченою. Необхідно детально розібратися в механізмі та принципах дії технологій самовідновлення, які вже використовуються на практиці, і провести дослідження щодо майбутніх перспективних методів.

Основна мета досліджень самовідновлюваних покриттів – це розроблення розумної та ефективної системи дорожнього покриття, здатної до самооцінки та автоматизованого ремонту тріщин. Різні методи самовідновлення асфальтових покриттів (Self-Healing Asphalt Pavements – SHAP), їх оптимальні умови відновлення наведені на рисунку 8.



Рис. 8. Методи самовідновлення асфальтових покриттів [22]

1. Самовідновлення асфальтових покриттів

Мікротріщини, що виникають внаслідок постійних транспортних навантажень, якщо їм дозволити зцілитися, можуть запобігти поширенню макротріщин та відновити міцність дорожнього покриття. Однією з переваг самовідновлення дорожнього покриття став швидкий внутрішній ремонт, що зменшує перешкоди для руху та мінімізує витрати.

2. Самозцілення за допомогою цілющих засобів

Лікувальні речовини вводяться в асфальт за допомогою інкапсулювальних агентів, таких як мікрокапсули [23], порожнисті волокна та мікросудинні волокна. Під час утворення тріщини енергія руйнування на її краю відкриває герметичне середовище та вивільняє цілющу речовину.

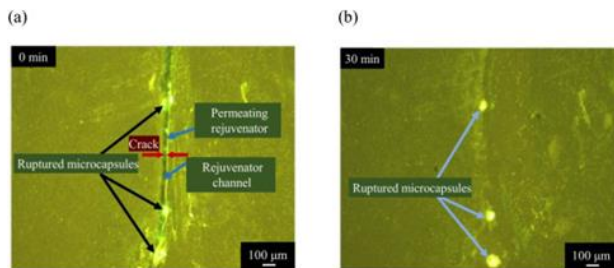


Рис. 9. Асфальт, що містить мікрокапсули: а – асфальт почав тріскатися; б – асфальт почав загоюватися протягом 30 хв [23]

3. Індукційний нагрів для самовідновлення

Хоча асфальт сам по собі має деякі властивості самовідновлення, його здатність до цього безпосередньо залежить від температури та тривалості періодів спокою. Проте за навколишньої температури неможливо забезпечити достатню кількість таких періодів, не призупинивши рух транспорту. Це спонукало до створення концепції самовідновлення за допомогою індукційного нагріву. Однак асфальт – електричний ізолятор, тому для індукційного нагріву потрібно надати йому електропровідність.

4. Гібридні технології самовідновлення в асфальті

Останнім часом активно досліджуються гібридні системи, які включають як охолодження, так і нагрівання. Дослідники, зокрема [23], розробили гібридну самовідновлювану систему з використанням індукційного нагріву та охолоджувальних капсул. Індукційний нагрів служить механізмом відновлення пошкоджень, в той час як капсули забезпечують охолодження зістареного асфальту і відновлюють його властивості. Крім того, підвищена температура за допомогою індукційного

нагріву може сприяти швидшому процесу дифузії охолоджувача в зістарений асфальт.

Серед різних існуючих технологій самовідновлення асфальтобетонних покриттів відповідну технологію слід обирати на основі таких критеріїв:

1) *Стійкість до впливу навколишнього середовища*: обрана технологія повинна бути стійкою до впливу факторів навколишнього середовища, таких як температурні зміни, вологість, агресивні речовини на дорозі тощо.

2) *Тривалість дії*: важливо вибрати технологію, яка забезпечує довготривалу захисну дію, зменшуючи потребу у частому обслуговуванні та ремонті.

3) *Екологічність*: технологія повинна бути екологічно безпечною, мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище під час встановлення та використання.

Обираючи технологію самовідновлення асфальтових покриттів, важливо враховувати всі ці критерії для забезпечення найкращого результату в плані тривалості служби та ефективності експлуатації нежорсткого дорожнього покриття.

Далі розглянемо основний матеріал для жорстких дорожніх і аеродромних покриттів – бетон. Цей матеріал широко використовується на будівельному ринку завдяки своїй доступності та вартості, хоча і схильний до утворення тріщин. Традиційний бетон при контакті з водою має механізм самовідновлення, який називається аутогенним загоєнням. Він має таку здатність, оскільки негідратований цемент залишається присутнім у матриці. Коли вода контактує з негідратованим цементом, відбувається подальша гідратація та «загоєє» тріщини. Сучасні дослідження спрямовані на посилення властивостей бетону до самовідновлення, а саме:

- Гідрогелі або суперабсорбувальні полімери (SAP) можуть вбирати значну кількість рідини та утримувати її, сприяючи закриттю тріщин. Після набухання вони вивільнюють рідину для внутрішнього затвердіння та ущільнення тріщин.

- Мікроорганізми, які виробляють карбонат кальцію, вбудовані в бетон і випускають його при утворенні тріщин, що сприяє їх закриттю.

- Інкапсульовані полімери розриваються при пошкодженні, вивільнюючи вміст. Це заповнює тріщину, яку полімер потім склеює разом, сприяючи її загоєнню.

Із використанням самовідновлюваних бетонів зменшується необхідність у виявленні та ремонті тріщин, це дає соціальні, економічні та екологічні переваги завдяки оптимізації використання матеріалів.

Самовідновлюваний бетон (Self-Healing Concrete – SHC) володіє властивістю автономного відновлення та зменшує необхідність у виявленні та усуненні внутрішніх пошкоджень (тріщин) без зовнішнього втручання (рис. 10).

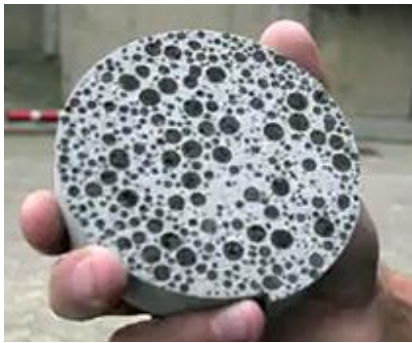


Рис. 10. Загальний вигляд самовідновлюваного бетону (біобетону)

Це сприяє запобіганню корозії арматури та деградації бетону, а також зменшує витрати та підвищує тривалість експлуатації. Протягом певного періоду тріщини можуть з'являтися у бетоні внаслідок гідратації мінералів або карбонізації гідроксиду кальцію.

Самовідновлюваний бетон, розроблений у 2006 році професором мікробіології Хенком Йонкерсом з Делфтського технологічного університету в Нідерландах, використовує спеціальні матеріали, такі як капсули або волокна, що містять ремонтні розчини [24]. Після 36 місяців експериментів було виявлено ідеальний метод – використання бактерій [25].

Самовідновлюваний бетон відрізняється здатністю автономно загоювати тріщини. Він моделює автоматичне загоєння шляхом викиду певного матеріалу для загоєння. Коли у бетоні з'являється тріщина, спеціальні капсули в ньому ламаються, а ремонтний матеріал заповнює цю тріщину для самостійного виправлення ушкодження. Це може подовжити термін експлуатації бетонних конструкцій і зробити їх більш екологічно чистими та міцними. Залежно від методу відновлення існують різні способи використання відновлювальних матеріалів для ремонту, кожен з яких має свої механізми дії (рис. 11).

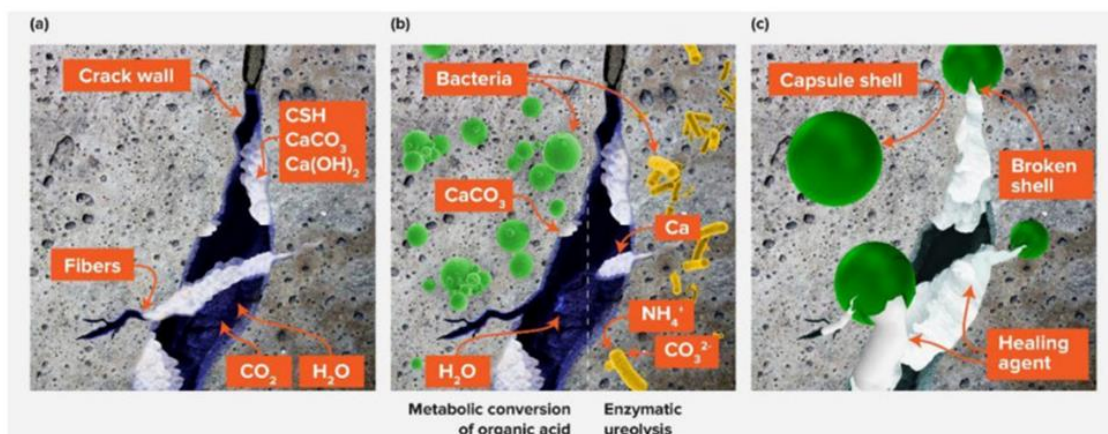


Рис. 11. Механізми самовідновлення: (a) аутогенні, (b) на основі автономних бактерій і (c) на основі автономних капсул [26]

Основна мета процесу самовідновлення – загоєння тріщин у бетонній конструкції.

Це продовжує термін служби бетонних конструкцій, роблячи їх більш міцними та стійкими.

1. Аутогенне самовідновлення (Autogenic self-healing – ASH) – це здатність бетону ремонтувати або загоювати тріщини за наявності вологи та відсутності напруги розтягування [27]. Процес аутогенного самовідновлення використовує лише вихідні матеріальні компоненти, які сприяють загоєнню завдяки своїй чіткій та активній хімічній природі за сприятливих умов навколишнього середовища для цього процесу. Загалом причини аутогенного самовідновлення можна поділити на три категорії: фізичні, хімічні та механічні [28]:

Фізичні фактори включають розширення цементної матриці навколо отвору тріщини в результаті поглинання води гідратованою цементною матрицею, що сприяє звуженню тріщини.

Хімічні причини пов'язані з двома основними процесами: триваючою гідратацією портландцементу та осадженням карбонату кальцію навколо тріщин.

Механічний ефект аутогенного самозалікування полягає в заповненні відкритих тріщин дрібними частинками, що просочуються з пошкодженої поверхні бетону або переносяться в тріщину водою.

Аутогенне загоєння найбільш ефективно для дуже малих тріщин (менше 0,3 мм у ширину).

2. Бактерія *Bacillus sphaericus* виявила здатність повністю вилікувати тріщини шириною до 0,97 мм, що майже в чотири рази більше, ніж у випадку без бактерій [29]. Однак існує обмеження ефективності самозагоєння для великих та широких тріщин. Важливими факторами постають вік та розмір тріщин, а також включення до цементних композицій різних агентів, таких як мінерали, бактерії та мікрокапсули з адгезивними елементами [30].

3. Наступний і один із найбільш поширених методів – це інкапсуляція. Процес герметизації відбувається, коли тріщина з'являється всередині сполучної матриці та поширюється через капсулу, яку

розриває, вивільняючи лікувальний агент. Виділена загоювальна речовина заповнює тріщину й стримує її подальше поширення. Зазвичай зменшення ширини та кількості тріщин у бетоні поліпшує його міцність. Тому механічні властивості бетону частково відновлюються.

Важливо уникати великої кількості порожнистих волокон або капсул, оскільки це може негативно вплинути на міцність цементної матриці. Однак дослідження підтверджують можливість ефективного самовідновлення в разі численних ушкоджень за допомогою методів інкапсуляції.

Незважаючи на переваги самовідновлюваного бетону, такі як відновлення та тривалість служби, важливо також звернути увагу на вартість його виробництва. Потрібні подальші дослідження, щоб знайти способи зниження витрат, пов'язаних із самовідновленням.

З використанням самовідновлення бетонні споруди стають менш піддатливими до зношування. Самовідновлення бетону створює можливість будувати довговічні конструкції, що витримують екстремальні умови експлуатації, такі як висока механічна втома та екстремальні температури. Деякі інфраструктурні об'єкти потребують тривалого терміну служби, який перевищує стандартні вимоги, наприклад, у морських або підземних спорудах, або в регіонах із суворим кліматом.

Самовідновлюваний бетон може значно знизити витрати на технічне обслуговування, незважаючи на збільшення вартості інфраструктури. Технологія самовідновлення може стати популярною для бетонних конструкцій в найближчому майбутньому, забезпечуючи довговічність та надійність споруд. Такі конструкції будуть ефективно витримувати експлуатаційні випробування, що робить їх ідеальними для різних проектів у містах та передмістях, забезпечуючи тривалий та ефективний ремонт.

Висновки.

1. Включення властивостей самовідновлення в асфальтобетонні

покриття стало ефективним методом для збільшення терміну їх служби та досягнення екологічності дорожнього одягу.

2. Досліджено наявні та вдосконалені технології самовідновлення, придатні для застосування в асфальтових покриттях, а саме: включення загоювальних речовин, індукційний нагрів та гібридні технології.

3. Вивчено механізми самовідновлення бетону: аутогенні, на основі автономних бактерій і на основі автономних капсул.

4. З'ясовано, що наразі успішно застосовуються самовідновлювані асфальт і бетон на основі мікрокапсул. Термін служби асфальтобетонних покриттів передбачається продовжити на 60–70%.

Як позитивні, так і негативні ефекти бетону та асфальту на основі мікрокапсул слід враховувати в конкретних випадках застосування. Самовідновлення важливе для того, щоб утримувати покриття автомобільних доріг й інфраструктурні об'єкти від передчасного руйнування.

5. Дослідження самовідновлюваних покриттів спрямовані на розроблення

розумної та ефективної системи дорожнього одягу, здатної до самооцінки та автоматизованого ремонту тріщин. Серед різних існуючих технологій самовідновлення асфальтобетонних покриттів відповідну технологію слід обирати на основі аналізу оптимальних умов відновлення та відповідної ефективності.

Вибір технології повинен базуватися на її здатності ефективно відновлювати пошкодження та тріщини в асфальті і бетони, забезпечуючи тривалий та надійний захист. Технологія повинна бути доступною з точки зору витрат. Важливо враховувати як вартість матеріалів, так і трудомісткість процесу.

Перспективи. Самовідновлювані дорожні покриття – це сукупність передових рішень для загоєння тріщин асфальту та бетону і збільшення терміну їх служби. Проте все це – ще галузь досліджень, що розвивається, з величезним потенціалом для інновацій та поліпшення життя людей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Відновлення та розбудова інфраструктури». Національна рада з відновлення України від наслідків війни. (2022) 178 с. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>
2. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Tkach Nataliia, Karasev Hennadii. Ensuring the sustainability of the roadbeds in the zones of the underground mine works. Vol. 123. EDP Sciences. 2019. P. 01041. 13 pp. Scopus. ISSN 25550403. DOI: 10.1051/e3sconf/201912301041. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211522441&eid=2-s2.0-85074287353>
3. Vasudevan R., Nigam S. K., Velkennedy R., Ramalinga A., Sekar Chandra, Sundarakannan B. Utilization of waste plastics for flexible pavement. Indian High Ways (Indian Road Congress). Vol. 34, № 7. Pp. 105–111. (July 2006). URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.555.1740&rep=rep1&type=pdf>
4. Toby McCartney CEO of The Plastic Road Company. URL: <https://environmentjournal.online/articles/interview-toby-mccartney-ceo-of-the-plastic-road-company/>
5. Пластикове покриття – дороги майбутнього. URL: <http://www.agroprofi.com.ua/statti/1901-plastykove-pokryttya-dorohy-maybutnoho>
6. PlasticRoad: Solution to the plastic waste problem. URL: <https://www.startupselfie.net/2022/05/11/plasticroad-solution-to-plastic-waste-problem/>
7. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Sankov Petro, Lukianenko Vladislav, Youb Khadija/ New construction solutions and materials for panels of road pavements. *Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture. AIP Conference Proceedings*. Vol. 2678. Pp. 020001. 2023, 15 February. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118620>; <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0118620>; <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57211518828&zone>
8. Балашова Ю. Б., Дем'яненко В. В., Бондаренко Л. П., Лук'яненко В. В., Балашов А. О. Альтернативні матеріали для покриттів автомобільних доріг. *Український журнал будівництва та архітектури*, 2023. № 2 (014). С. 7–18. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/issue/view/16663>; DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.7.925.
9. First highway with glow-in-the-dark markings opens in the Netherlands. URL: <https://newatlas.com/smart-highway-glowing-lines/34363/>
10. Electrified roads could power cars from the ground up. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg21128295-700-electrified-roads-could-power-cars-from-the-ground-up/>

11. Solar Roadways. URL: <https://solarroadways.com/specifics/solar/>
12. Holcim will Betonbeläge zum Aufladen von Elektromobilen entwickeln. URL: <https://www.swissinfo.ch/ger/alle-news-in-kuerze/holcim-will-betonbelaege-zum-aufladen-von-elektromobilen-entwickeln/47241652>
13. Topmix Permeable. URL: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Topmix_Permeable
14. Tabakovic A., Schlangen E. Self-healing technology for asphalt pavements. Delft University of Technology. *Advances in Polymer Science*. November, 2016. Pp. 1–22. URL: https://doi.org/10.1007%2F12_2015_33; https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/45373235/Self_healing_Technology_for_Asphalt_Pavements_Revised.pdf
15. Self-healing Concrete Wins Innovation Award. URL: <https://www.costain.com/news/news-releases/self-healing-concrete-wins-innovation-award/>
16. WPI Researcher Develops Self-Healing Concrete that Could Multiply Structures' Lifespans, Slash Damaging CO₂ Emissions. URL: <https://www.wpi.edu/news/wpi-researcher-develops-self-healing-concrete-could-multiply-structures-lifespans-slash>
17. Das B. P., Siddagangaiah A. K. Identification of parameter to assess cracking resistance of asphalt mixtures subjected to aging and moisture conditioning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022. Vol. 9, iss. 2. Pp. 293–304. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85128540892&origin=inward&txGid=76cc93e4c7727f978bbb659ad59347fd>
18. Gardner D., Lark R., Jefferson T. et Davies R. A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. Pp. 238–247. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042198855&origin=inward&txGid=6822f8f5e79075370376584e2ef36d75>
19. Enlin Ma, Xi Chen, Jinxing Lai, Xiangze Kong, Chunxia Guo. Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2023. Vol. 10, iss. 3. Pp. 368–384. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.02.003>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756423000533>
20. Cui G., Ma J., Wang D. Applying the new corrugated steel plate (NCSP) liner in the seasonally frozen tunnel to enhance the insulation capacity of linings. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. № 26. Art. 101130. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119247736&origin=inward&txGid=a4ba994c29e212e1960215c912fe6d2b>
21. Schreiberova H., Bily P., Fladr J. et al. Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2019. № 11. Art. e00250. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85066302842&origin=inward&txGid=860287fe5d04365807b7034239220797>
22. Anupam B. R., Umesh Chandra Sahoo, Anush K. Chandrappa. A methodological review on self-healing asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 321. Art. 126395. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126395>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822000897>
23. Xue C., Li W., Li J. et al. A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. *Structural Concrete*. 2019. № 20 (1). Pp. 198–212. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052850583&origin=inward&txGid=1c6a95f0c3c5c990eea059ac4fc74715>
24. Qureshi T., Al-Tabbaa A. *Advanced Functional Materials*. IntechOpen; London, UK: 2020. *Self-Healing Concrete and Cementitious Materials*. DOI: 10.5772/intechopen.92349. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/72141>
25. Khitab A., Anwar W., Ul-Abdin Z., Tayyab S., Ibrahim O. A. *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: 2019. Applications of self healing nano concretes. Pp. 501–524. URL: https://www.elsevier.com/books-and-journals:https://www.researchgate.net/profile/Elham-Mansouri-2/publication/338816425_Radiation_protection_characteristics_of_nano-concretes_against_photon_and_neutron_beams/links/5ee8eeb7458515814a62e4a1/Radiation-protection-characteristics-of-nano-concretes-against-photon-and-neutron-beams.pdf
26. Amran M., Onaizi Ali M., Fediuk R., Vatin N., Rashid R. S. M., Abdelgader H., Ozbakkaloglu T. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: a review. 2022. *Materials*. Basel. Vol. 15 (9). Pp. 3214. DOI: 10.3390/ma15093214. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9106089/#B34-materials-15-03214>
27. Qureshi T., Kanellopoulos A., Al-Tabbaa A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. *Constr. Build. Mater.* 2018. № 192. Pp. 768–784. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.143. URL: https://www.researchgate.net/publication/328290640_Autogenous_self-healing_of_cement_with_expansive_minerals-I_Impact_in_early_age_crack_healing
28. Qureshi T. S., Al-Tabbaa A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO. *Smart Mater. Struct.* 2016. № 25. Pp. 084004. DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084004. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/8/084004/meta>

29. Qian C., Chen H., Ren L., Luo M. Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. *Front. Microbiol.* 2015. № 6. Pp. 1225. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01225.29. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.01225/full>

30. Yang Y., Lepech M. D., Yang E. H., Li V. C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cem. Concr. Res.* 2009. № 39. Pp. 382–390. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.013. URL: https://www.researchgate.net/publication/222421225_Autogenous_healing_of_engineered_cementitious_composites_under_wet-dry_cycles

REFERENCES

1. *Proekt Planu vidnovlennia Ukrainy* [Draft Recovery Plan for Ukraine.] *Materialy robochoi hrupy "Vidnovlennia ta rozbudova infrastruktury"* [Materials of the working group "Restoration and Development of Infrastructure"]. National Council for the Restoration of Ukraine from the Consequences of War. 2022, 178 p. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf> (in Ukrainian).

2. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Tkach Nataliia and Karasev Hennadii. Ensuring the sustainability of the roadbeds in the zones of the underground mine works. Vol. 123, EDP Sciences, 2019, p. 01041, 13 p., Scopus, ISSN 25550403, doi: 10.1051/e3sconf/201912301041. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211522441&eid=2-s2.0-85074287353>

3. Vasudevan R., Nigam S.K., Velkennedy R., Ramalinga Chandra Sekar A. and Sundarakannan B. Utilization of waste plastics for flexible pavement, Indian High Ways (Indian Road Congress). 2006, vol. 34, no. 7, pp. 105–111. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.555.1740&rep=rep1&type=pdf>

4. McCartney Toby CEO of The Plastic Road Company. URL: <https://environmentjournal.online/articles/interview-toby-mccartney-ceo-of-the-plastic-road-company/>

5. *Plastykove pokryttia – dorohy maibutnoho* [Plastic pavement – roads of the future] 2020. URL: <http://www.agroprofi.com.ua/statti/1901-plastykove-pokryttya-dorohy-maybutnoho> (in Ukrainian).

6. PlasticRoad: Solution to the plastic waste problem. 2022. URL: <https://www.startupselfie.net/2022/05/11/plasticroad-solution-to-plastic-waste-problem/>

7. Balashova Yuliia, Demianenko Viktor, Sankov Petro, Lukianenko Vladislav and Youb Khadija. New construction solutions and materials for panels of road pavements. *Innovative Technologies in Construction. Civil Engineering and Architecture. AIP Conference Proceedings*, 2023, no. 2678, 020001, pp. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118620>; <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0118620>; <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57211518828&zone>

8. Balashova Yu.B., Demianenko V.V., Bondarenko L.P., Lukianenko V.V. and Balashov A.O. *Alternatyvni materialy dlia pokryttiv avtomobilnykh dorih* [Alternative materials for pavements of roads]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 2 (014), pp. 7–18, ISSN 2710-0367 (Print), ISSN 2710-0375 (Online). URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/issue/view/16663/>; DOI:10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.7.925. (in Ukrainian).

9. First highway with glow-in-the-dark markings opens in the Netherlands. URL: <https://newatlas.com/smart-highway-glowing-lines/34363/>

10. Electrified roads could power cars from the ground up. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg21128295-700-electrified-roads-could-power-cars-from-the-ground-up/>

11. Solar Roadways. URL: <https://solarroadways.com/specifics/solar/>

12. Holcim will Betonbeläge zum Aufladen von Elektromobilen entwickeln. 2022. URL: <https://www.swissinfo.ch/ger/alle-news-in-kuerze/holcim-will-betonbelaege-zum-aufladen-von-elektromobilen-entwickeln/47241652>

13. Topmix Permeable. 2020. URL: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Topmix_Permeable

14. Tabakovic A. and Schlangen E. Self-healing technology for asphalt pavements. 2016. Delft University of Technology. *Advances in Polymer Science*, (November), pp. 1–22. URL: https://doi.org/10.1007%2F12_2015_33; https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/45373235/Self_healing_Technology_for_Asphalt_Pavements_Revised.pdf

15. Self-healing Concrete Wins Innovation Award. 2014. URL: <https://www.costain.com/news/news-releases/self-healing-concrete-wins-innovation-award/>

16. WPI Researcher Develops Self-Healing Concrete that Could Multiply Structures' Lifespans, Slash Damaging CO₂ Emissions. 2021. URL: <https://www.wpi.edu/news/wpi-researcher-develops-self-healing-concrete-could-multiply-structures-lifespans-slash>

17. Das B.P. and Siddagangaiiah A.K. Identification of parameter to assess cracking resistance of asphalt mixtures subjected to aging and moisture conditioning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022, vol. 9, iss. 2, pp. 293–304. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85128540892&origin=inward&txGid=76cc93e4c7727f978bbb659ad59347fd>

18. Gardner D., Lark R., Jefferson T. et Davies R. A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*.

2018, vol. 8, pp. 238–247. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042198855&origin=inward&txGid=6822f8f5e79075370376584e2ef36d75>

19. Enlin Ma, Xi Chen, Jinxing Lai, Xiangze Kong, Chunxia Guo. Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction : a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2023, vol. 10, iss. 3, pp. 368–384. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.02.003>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756423000533>

20. Cui G., Ma J. and Wang D. Applying the new corrugated steel plate (NCSP) liner in the seasonally frozen tunnel to enhance the insulation capacity of linings. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021, no. 26, article 101130. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119247736&origin=inward&txGid=a4ba994c29e212e1960215c912fe6d2b>

21. Schreiberova H., Bily P., Fladr J. et al. Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, no. 11, article e00250. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85066302842&origin=inward&txGid=860287fe5d04365807b7034239220797>

22. Anupam B.R., Umesh Chandra Sahoo and Anush K. Chandrappa. A methodological review on self-healing asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 321, article 126395. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126395>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822000897>

23. Xue C., Li W., Li J. et al. A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. *Structural Concrete*. 2019, no. 20 (1), pp. 198–212. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052850583&origin=inward&txGid=1c6a95f0c3c5c990eea059ac4fc74715>

24. Qureshi T. and Al-Tabbaa A. *Advanced Functional Materials*. IntechOpen; London, UK: 2020. Self-Healing Concrete and Cementitious Materials. DOI: 10.5772/intechopen.92349. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/72141>

25. Khitab A., Anwar W., Ul-Abdin Z., Tayyab S. and Ibrahim O.A. *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: 2019. Applications of self healing nano concretes, pp. 501–524. URL: https://www.elsevier.com/books-and-journals:https://www.researchgate.net/profile/Elham-Mansouri-2/publication/338816425_Radiation_protection_characteristics_of_nano-concretes_against_photon_and_neutron_beams/links/5ee8eeb7458515814a62e4a1/Radiation-protection-characteristics-of-nano-concretes-against-photon-and-neutron-beams.pdf

26. Amran M., Ali M. Onaizi, Fediuk R., Vatin N., Rashid R.S.M., Abdelgader H. and Ozbakkaloglu T. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material : a review. *Materials (Basel)*. 2022, no. 15 (9), 3214. DOI: 10.3390/ma15093214. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9106089/#B34-materials-15-03214>

27. Qureshi T., Kanellopoulos A. and Al-Tabbaa A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. *Constr. Build. Mater*. 2018, no. 192, pp. 768–784. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.143. URL: https://www.researchgate.net/publication/328290640_Autogenous_self-healing_of_cement_with_expansive_minerals-I_Impact_in_early_age_crack_healing

28. Qureshi T.S. and Al-Tabbaa A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO. *Smart Mater. Struct.* 2016, no. 25, 084004. DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084004; URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/8/084004/meta>

29. Qian C., Chen H., Ren L. and Luo M. Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. *Front. Microbiol.* 2015, no. 6, 1225. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01225.29. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.01225/full>

30. Yang Y., Lepech M.D., Yang E.H. and Li V.C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cem. Concr. Res.* 2009, no. 39, pp. 382–390. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.013. URL: https://www.researchgate.net/publication/222421225_Autogenous_healing_of_engineered_cementitious_composites_under_wet-dry_cycles

Надійшла до редакції: 24.04.2024.

УДК 528.38/.41:[510.633.3+519.876.5-048.66]
DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.33.1057

ЛОГІКО-ЙМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДМОВ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ

БЄГІЧЕВ С. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
ІШУТИНА Г. С.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
ТРЕГУБ О. В.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

Анотація. Достовірність та надійність результатів геодезичних і кадастрових робіт залежить головним чином від точності інструментів, кваліфікації спостерігача, його професіоналізму і надійності пунктів геодезичної мережі (ГМ). Як правило, у більшості випадків існує обґрунтований вибір відповідних за точністю геодезичних інструментів і залучають інженера-геодезиста високої кваліфікації для виконання певних видів геодезичних робіт. Проте щодо визначення вихідних пунктів для створення надійного геодезичного знімального обґрунтування можуть виникнути певні питання. Визначення надійних геодезичних пунктів для виконання інженерно-геодезичних робіт на основі методів оцінювання надійності – це актуальне наукове завдання сьогодення. **Мета роботи** – підібрати метод оцінювання надійності на основі аналізу існуючих та адаптувати для вирішення проблеми оцінювання надійності геодезичних мереж як одного з найважливіших параметрів, що характеризують їх стан. Оцінити надійність геодезичної мережі м. Дніпро шляхом побудови дерева відмов. Розрахувати динаміку інтенсивності відмов ГМ протягом 100-річного періоду її існування. Обчислити доцільну періодичність обстежень (моніторингу) ГМ залежно від інтенсивності відмов її елементів (геодезичних пунктів). **Методика.** Аналіз міжнародних і національних стандартів з оцінювання надійності, Стандарти України, де наведені методи оцінки надійності різних систем. Огляд методів для оцінювання надійності ГМ. Застосований дедуктивний метод з побудовою дерева відмов геодезичної мережі, в основі якого лежить логіко-ймовірнісна модель причинно-наслідкових зв'язків відмов системи з відмовами її елементів та іншими подіями. **Наукова новизна.** Встановлено оптимальний метод оцінки надійності ГМ. Побудовано дерево відмов ГМ у програмному засобі TopEvent FTA. Виконано оцінку надійності геодезичної мережі, обчислено інтенсивність відмов на різних етапах її функціонування, описано математичні вирази функцій відмов геодезичної мережі шляхом застосування булевих функцій. **Практична значимість.** Проаналізовано міжнародні та національні нормативні документи з оцінки надійності, Стандарти України, де наведені методи оцінювання надійності систем. Виконана оцінка надійності стану ГМ м. Дніпро допомагає обирати стабільні геодезичні пункти для створення локальних геодезичних мереж та знімального обґрунтування. Обґрунтовано доцільну періодичність моніторингу геодезичних пунктів. Використання надійних пунктів геодезичних мереж дозволить отримати достовірні дані спостережень, що значно підвищить якість інженерно-геодезичних робіт. **Результати.** Розглянуто функціонування геодезичної мережі м. Дніпро на побудованому послідовному дереві відмов. Застосовано булеві функції для опису математичних виразів функцій відмов геодезичної мережі, що включає 5 та 10 елементів.

Ключові слова: державна геодезична мережа; оцінка надійності; дерево відмов; моніторинг; оновлення геодезичних пунктів; булеві функції; метод мінімальних перерізів; триангуляція

LOGICAL-PROBABLIC MODELING OF FAILURES OF GEODESIC NETWORKS

BIENICHEV S.V.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
ISHUTINA H.S.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

TREGUB O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

Abstract. The credibility and reliability of the results of geodetic and cadastral works depends mainly on the accuracy of the instruments, the qualification of the observer, his professionalism and the reliability of the points of the geodetic network (GN). As a rule, in most cases, there is a well-founded choice of geodetic tools suitable for accuracy and the involvement of a highly qualified geodetic engineer to perform certain types of geodetic work. However, certain questions may arise regarding the determination of starting points for the creation of a reliable geodetic survey justification. The issue of selecting reliable geodetic points for performing engineering and geodetic works based on the application of reliability assessment methods is an urgent scientific problem today. *The purpose of the work* is to establish the optimal reliability assessment method based on the analysis of existing ones. Adapt this method to solve the problem of assessing the reliability of geodetic networks as one of the most important parameters characterizing its condition. Assess the reliability of the Dnipro geodetic network by constructing a fault tree. Calculate the dynamics of the intensity of GN failures during the 100-year period of its existence. Calculate the appropriate periodicity of surveys (monitoring) of GN depending on the intensity of failures of elements (geodetic points). *Methodology.* Analysis of international and national standards for reliability assessment, Standards of Ukraine, where the methods of system reliability assessment are given. Review of methods for assessing GN reliability. The deductive method with the construction of a geodetic network failure tree has been applied. This method is based on a logic-probabilistic model of cause-and-effect relationships of system failures with failures of its elements and other events. *Scientific novelty.* The optimal method of assessing the reliability of GN has been established. A GN failure tree has been built in the TopEvent FTA software tool. The reliability of the geodetic network has been evaluated, the intensity of failures at various stages of its operation has been calculated. Mathematical expressions of the failure functions of the geodetic network have been described by applying Boolean functions. *Practical value.* International and national regulatory documents and Standards of Ukraine of reliability assessment have been analyzed. In Standards the methods of system reliability assessment have been given. The performed assessment of the reliability of the state of the geodetic network of the city of Dnipro helps to choose stable geodetic points for the creation of local geodetic networks and survey justification. Reasonable periodicity of monitoring for the survey of geodetic points has been substantiated. The use of reliable points of geodetic networks will allow obtaining reliable observation data, which will significantly increase the quality of engineering and geodetic works. *Results.* The functioning of the geodetic network of the city of Dnipro on the constructed sequential tree of failures has been considered. Boolean functions to describe the mathematical expressions of the failure functions of the geodetic network, which includes 5 and 10 elements have been used.

Keywords: *state geodetic network; reliability assessment; Fault Tree; monitoring; update of geodetic points; Boolean functions; minimum sections; triangulation*

Постановка проблеми. Геодезичні мережі (ГМ) становлять основу, за допомогою якої вирішуються різні наукові та практичні питання. Вони використовуються в різних галузях сучасної науки, таких як аналіз деформації земної кори, моніторинг штучних споруд, встановлення та підтримка геопросторової системи відліку, картографування, землеустрій, геодезичний супровід цивільного будівництва тощо. Основні характеристики ГМ – точність визначення її пунктів та їх надійність. Одним із найважливіших компонентів для забезпечення якості геодезичної мережі стало використання надійних пунктів, які

будуть зберігати стабільність просторового положення протягом усього терміну існування мережі.

У Законі України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» визначено: «... державна геодезична мережа (ДГМ) – мережа геодезичних пунктів, що забезпечує поширення координат на територію держави і є вихідною для створення інших геодезичних мереж». «Геодезичний пункт – пристрій і (або) споруда для позначення на місцевості точок земної поверхні з відомими координатами і висотами» [1].

Механізм побудови ДГМ із застосуванням сучасних глобальних

навігаційних супутникових систем, строгих математичних методів оброблення даних та інформаційних технологій, а також традиційних геодезичних методів визначення Порядком побудови Державної геодезичної мережі [2]. В цьому Порядку наведена структура ДГМ, що включає геодезичну (планову), нівелірну (висотну) та гравіметричну мережі, пункти яких повинні бути суміщені або між якими встановлено надійний геодезичний зв'язок.

З впливу різних факторів (антропогенних та природних) пункти геодезичних мереж зазнають зміщень або знищень, втрачають стале положення і потребують відновлення. Моніторинг геодезичних пунктів ДГМ згідно з Порядком [2] «проводиться Держгеокадастром шляхом забезпечення систематичного та періодичного обстеження їх стану. Систематичне обстеження та оновлення геодезичних пунктів ДГМ здійснюються виконавцями геодезичних робіт на окремих територіях під час проведення топографо-геодезичних робіт, земельно-кадастрової зйомки, інженерно-геодезичних вишукувань, пов'язаних з використанням геодезичних пунктів ДГМ. Періодичне обстеження та оновлення геодезичних, гравіметричних пунктів і нівелірних реперів проводяться у міру потреби, але не рідше ніж один раз на 10 років, а на території міст і зон активної господарської діяльності – не рідше ніж один раз на п'ять років» [2].

Механізм обстеження та оновлення пунктів ДГМ наведений у Порядку [3], згідно з яким обстеження полягає у відшукуванні геодезичних пунктів на місцевості, визначенні стану їх центрів (реперів), зовнішнього оформлення та охоронних стовпів, а оновлення – це комплекс робіт із ремонту (заміни) складових їх елементів.

Отже, шляхом періодичного моніторингу геодезичних пунктів можна виявити їх стан (збереженість) і сталість їх положення. Шляхом оновлення можна відновити геодезичну мережу. Проте періодичність обстежень ДГМ у сучасних

умовах недостатня. Більшість пунктів ДГМ, що використовуються для створення локальних геодезичних мереж, назвати надійними немає підстав. Для виявлення ступеня надійності пунктів ГМ, що використовуються як вихідні, необхідно виконати математичний аналіз із застосуванням відповідних методів оцінки надійності.

Питання відбору надійних геодезичних пунктів, за результатами оцінювання їх надійності, для використання під час виконання інженерно-геодезичних робіт – актуальне наукове завдання сьогодення.

Виділення невирішеної проблеми.

Якість інженерно-геодезичних робіт і достовірність результатів геодезичних вимірів залежать від комплексного впливу факторів: впливу зовнішнього середовища, точності геодезичних приладів, особистих фізичних властивостей спостерігача, його професіоналізму і надійності пунктів знімального обґрунтування. Якщо позбутися впливу зовнішнього середовища повністю неможливо, то вплив інших складових чинників можна звести до мінімуму. Наразі є широкий спектр геодезичних приладів, які дозволяють виконувати кутові виміри з точністю до десятих значень секунд, лінійні виміри – до десятих часток міліметра, а перевищень – до півміліметра на один кілометр подвійного ходу. Висока професійна підготовка спеціалістів-геодезистів дозволяє якісно виконувати спостереження, а автоматизовані системи відрахування зовсім ліквідують «людський фактор». Проте, на жаль, фактор надійності знімального обґрунтування вивчений слабо.

Надійність, у загальному значенні, – це «властивість зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах експлуатації, технічного обслуговування, зберігання та транспортування» [4]. Під *надійністю геодезичних пунктів* будемо розуміти їх властивість зберігати стабільне просторове положення протягом усього часу експлуатації, тобто бути довговічними, та

зберігати точність їх положення відповідно до категорії геодезичної мережі [5].

Існує багато різних методів оцінювання надійності, які можна класифікувати:

- залежно від обраної моделі надійності (імовірнісні моделі надійності та структурно-імовірнісні);
- залежно від підходів до оцінювання (суб'єктивний, дискретний та комплексний);
- залежно від закону розподілу випадкових величин (методи, які ґрунтуються на припущенні щодо експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи, що описують спонтанні відмови незалежного випадкового характеру, та методи, які використовують гіпотези щодо безвідмовної роботи за нормальним розподілом, розподілом Релея і Вейбула, гама-розподілом).

Метод рівномірного розподілу надійності можна застосувати для оцінки надійності геодезичної мережі, як системи, що включає з однаковою надійністю n елементів (геодезичних пунктів), які рівномірно розташовані на певній території.

Це простий метод, який застосовують у разі відсутності експериментальних даних про надійність окремих підсистем:

$$R_G = \prod_{i=1}^n R_i = R_i^n, \quad (1)$$

де R_G – задана надійність; R_i – надійність i -ї підсистеми.

Надійність геодезичної мережі також можна визначити через інтенсивність відмов за умов експоненціального розподілу, застосувавши метод вагових коефіцієнтів:

$$\sum_{i=1}^r N_i K_i = \sum_{i=1}^r \frac{N_i K_i}{\lambda}, \quad (2)$$

де r – кількість блоків (елементів) різноманітних типів; K_i – коефіцієнт надійності i -го елемента; λ – інтенсивність відмов елемента, прийнятого як еталона; λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента; N_i – кількість елементів i -го типу.

За допомогою цього методу можна розрахувати надійність за обмежених даних.

Метод урахування впливу факторів на надійність дозволяє встановити залежність між надійністю ГМ та факторами впливу (природними та техногенними). Для цього

потрібно проаналізувати вплив кожного фактора на надійність геодезичних пунктів (чутливість елементів системи на ці впливи) та критичність відмов.

У *методі розрахунку надійності за даними про інтенсивність відмов* потрібно мати статистичні дані про надійність різних типів елементів, що розташовані в різних інженерно-геологічних умовах, в зонах із різним техногенним навантаженням, з різними умовами зовнішнього середовища (вологість, температурний режим тощо).

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^r \lambda_i N_i, \quad (3)$$

де λ_i – інтенсивність відмов (зміщень або знищень) елементів; N_i – кількість елементів.

Матричний метод розрахунку надійності ГМ застосований у публікаціях К. Третяка та І. Савчина [6; 7]; наведено матриці можливих станів геодезичної системи, що враховують усі можливі події:

$$P = \sum_{i=0}^k P(H_i). \quad (4)$$

Складність цього методу полягає у великому обсязі розрахунків. При цьому неможливо обчислити кількісні характеристики надійності як функції часу.

У методі *статистичного моделювання (метод Монте-Карло)* на ЕОМ багаторазово простежують процес функціонування ГМ, тобто створюють її математичну імовірнісну модель, яка відображає в реальному часі події відмови геодезичної мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Першим міжнародним стандартом із надійності, що з'явився у світі, був американський військовий стандарт MIL-HDBK-217 Part Stress & Part Count (оцінка надійності з навантаженням та без нього), в якому були зібрані всі можливі моделі, формули для оцінювання показників надійності з потужним довідковим матеріалом. З 1995 року цей стандарт перестав поновлюватися у зв'язку із великим об'ємом, проте цей нормативний документ і сьогодні залишається основним стандартом, що використовується у світі.

Остання ревізія цього стандарту була виконана італійським центром Reliability

Information Analysis Center (RIAC) в 2006 році за певними методиками розроблення моделей для попередньої оцінки надійності. На початку 2000-х років у США (після завершення існування стандарту MIL-217) з'явився стандарт Telcordia SR3332, Issue 1, May 2001, який вже не містив довідкових даних порівняно з MIL-217, а був спрямований на телекомунікаційні системи.

В Європі основним стандартом з надійності став FIDES Guide 2009 (Франція), який включає цілий ряд методологій з оцінювання надійності різних радіоелектронних систем. Перевага FIDES у тому, що цей стандарт враховує не тільки надійність окремих елементів, а й процеси проектування та експлуатації. У ньому використовуються більш прогресивні моделі, які враховують найбільшу кількість різних чинників, що впливають на надійність (з потрібною точністю і докладністю). Це основний стандарт з надійності у світі і Європейському союзі.

Стандарт NPRD-95 Non-electronic Parts Reliability Data (а також NPRD-2016) містить специфічні моделі для неелектронних частин, а стандарт NSWC-98 Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, запозичений у військового-морського флоту США, містить усі необхідні моделі для розрахунку механічного обладнання (різних видів двигунів).

До національних стандартів оцінки надійності можна віднести:

- британський стандарт BRT-British Telecom Module for reliability prediction based on British Telecom document HRD-4 or HRD-5 – спочатку був галузевим стандартом для телекомунікацій, який згодом розвинувся до національного стандарту з оцінки надійності різних електронних і телекомунікаційних систем, що містить значну частину зі Стандарту Telcordia, але має певні нюанси, що використовуються у Великобританії;

- французький стандарт RDF 2000 (UTEC 80810) – це попередник стандарту FIDES, містить частину стандарту MIL-217 з розвитком методів оцінювання надійності,

що використовувався як для електронних компонентів, так і інших;

- французький стандарт CNET RDF 93 Revision 2/95 використовувався для французької радіоелектронної продукції;

- німецький стандарт Siemens SN29500.1- Siemens reliability standard;

- китайський стандарт GJB299 – копія стандарту MIL-217.

Наведені міжнародні та національні стандарти реалізовані в програмному забезпеченні з оцінки надійності: ALD, ReliaSoft (Reliability Analysis and Management), IQ-Software, Windchill.

Комплект ПЗ ALD – це високоякісний продукт, який з'явився в результаті понад 30-річного досвіду у сфері розроблення та вдосконалення ПЗ з аналізу надійності та відмови безпеки для величезної кількості організацій цивільної та військової авіації, зв'язку, космічної промисловості та електроніки – лідерами у своїх галузях, серед яких THALES, BAE Systems, Lockheed Martin, NASA, MBDA, SAGEM та багато інших.

Програмне забезпечення ReliaSoft надає потужний набір програмних рішень для перевірки надійності, щоб полегшити комплексний набір методів інженерного моделювання та аналізу надійності.

Наразі в Україні діють певні нормативні документи [8–13], які з'явилися у 1994 році, що дублюють радянські стандарти 1980-х років, де чітко визначений термін «надійність» та наведені методи оцінювання надійності систем.

Стандарт ДСТУ 2860-94 [8] – це загальний стандарт, який містить усі терміни з оцінки надійності та регламентує показники для оцінки надійності.

Стандарт ДСТУ 2862-94 [9] більш практичний, дає методики розрахунку показників надійності та містить конкретні формули для розрахунку на етапі проектування надійності електронних, механічних та інших частин. Має досить оригінальні математичні моделі, особливо для систем зі старінням.

ДСТУ 2863-94 [10] – загальний стандарт, в якому міститься інформація як

підтримувати надійність від моменту проектування до моменту утилізації; які методи застосовуються на етапах проектування для підтримання чи забезпечення на етапі виробництва і експлуатації, зберігання.

У стандарті ДСТУ 2864-94 [11] наведено формули для експериментального розрахунку надійності.

Методи оцінювання показників надійності за експериментальними даними наведені у стандарті ДСТУ 3004-95 [12].

Стандарт ДСТУ 3433-96 [13] установлює вимоги до функцій розподілу випадкових величин, що використовуються як моделі відмов чи моделі надійності, наведені схеми розподілів відмов, а також методи вибору моделей відмов для конкретних ситуацій.

З різних ракурсів проблемі надійності геодезичних мереж присвячені праці як українських, так і закордонних вчених: К. Р. Третяка, І. Р. Савчина, С. В. Бегічева, Г. С. Ішутіної, Gilad Even-Tzur, Marcelo Tomio Matsuoka, Waldemar Odziemczyk, Amiri-Simkooei та ін.

У публікації [14] автор досліджував зовнішню надійність геодезичних мереж, що залежить від їх геометрії (кількість та розподіл базових точок мережі). У статті наведено результати чисельних експериментів, проведених із схематичною плановою мережею GPS. Ці результати свідчать, що достовірність скоригованих координат у геодезичній мережі залежить від геометричного розподілу точок, які визначають базу мережі.

Автори статті [15] розробили метод автоматичного вибору розташування контрольних точок геодезичних мереж на основі теорії надійності. Запропонований спосіб проектування геодезичної мережі (замкненого нівелірного ходу) базується на найменшому значенні максимальної зовнішньої надійності. Метод не потребує використання вектора спостереження моделі Гаусса – Маркова. Головна увага приділена геометричній конфігурації мережі (задана матрицею Якобі) та невизначеності спостережень (задана точністю приладу,

методами вимірювання та зовнішніми умовами). Мета роботи [15] – знаходження оптимального розташування контрольних точок, за якого було б зведено до мінімуму зміщення геодезичних пунктів.

Предметом дослідження в публікації [16] стала оптимізація розподілу точності спостережень для отримання збалансованих показників достовірності спостережень. Виконано перевірку придатності двох методів оптимізації, заснованих на алгоритмах оптимізації (імітації відпалу, англ. Simulated annealing та оптимізації Хука – Дживса), для вирішення зазначеної проблеми. Аналітичний метод, запропонований Amiri-Simkooei, застосовувався як еталон. Ефективність вищезазначених методів перевірялася на двох змодельованих лінійно-кутових мережах. Завдяки прийнятному робочому часу та можливості визначення граничних умов на кінцевому розв'язку метод Хука – Дживса виявився найбільш придатним для розв'язання аналізованої задачі.

Мета роботи – підібрати метод оцінювання надійності на основі аналізу існуючих геодезичних мереж та адаптувати для вирішення проблеми оцінки надійності геодезичних мереж як одного з найважливіших параметрів, що характеризують їх стан. Оцінити надійність геодезичної мережі м. Дніпро шляхом побудови «дерева відмов». Розрахувати динаміку інтенсивності відмов ГМ протягом 100-річного періоду її існування. Обчислити доцільну періодичність обстежень (моніторингу) ГМ залежно від інтенсивності відмов її елементів (геодезичних пунктів).

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів. Геодезична мережа м. Дніпро зазнала значних змін протягом останніх 100 років. Триангуляційна мережа Катеринослава (1911–1915 рр.) складалася з 15 основних пунктів, 9 церков, визначених прямими засічками, та 26 точок, вирішених по задачі Потенота. Триангуляційна мережа протягом 1915–1918 рр. складалася з 12 опорних пунктів I класу, 5 – II класу і 34 – III класу (рис. 1) [5].

Тригонометрична мережа Дніпропетровська 1927 р. (рис. 2) складалася з 18 пунктів I класу, з них 14 шт. – взаємно пов’язаних у мережі I класу та 4 пункти полігонометрії вставлялися в мережу двосторонніми спостереженнями. Додаткові пункти тригонометричної мережі (до 90 штук) розбиті на дві групи: на пункти II класу (28 шт), визначені прямою засічкою, і пункти III класу (56 шт), визначені зворотною засічкою.

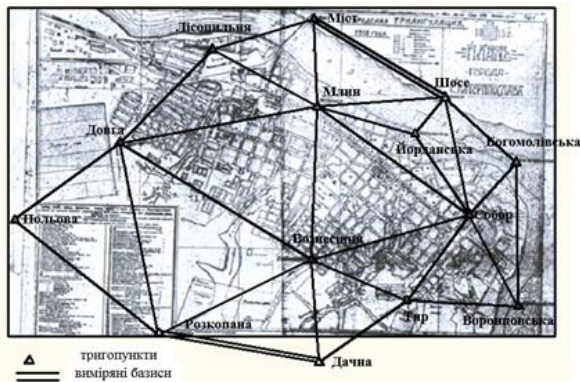


Рис. 1. Міська триангуляція Катеринослава 1916 року

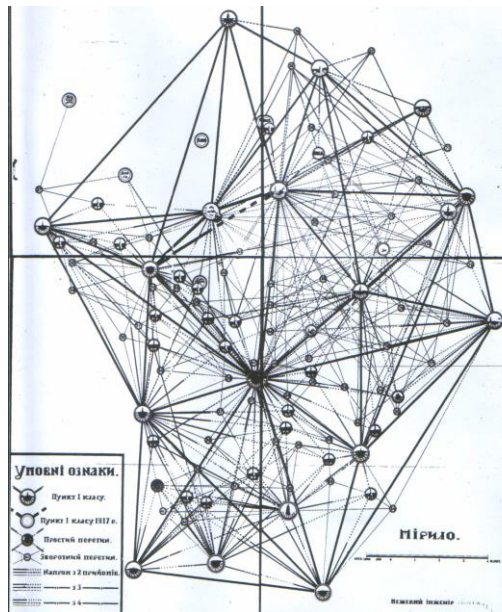


Рис. 2. Тригонометрична мережа 1927 року [5]

Основною проблемою у післявоєнний період (1943 – 1963 рр.) була незабезпеченість міста опорними геодезичними мережами, бо існуючі мережі (закладені в 1927–1929 рр.) значною мірою були знищені, особливо в період окупації і, крім того, за точністю вони не відповідали вимогам діючої Інструкції.

Натурне обстеження місцевості показало втрату майже 50 % всіх геодезичних пунктів. З обстежених 2 300 пунктів було виявлено лише 880 або 38 %, причому деякі райони міста, а також нові селища взагалі не мали геодезичного забезпечення. Із 900 стінних реперів збереглися близько 600, але окремі райони міста виявилися абсолютно позбавлені висотної основи.

У 1957 році в центрі міста і на південній його околиці було прокладено полігонометричні ходи I, II і III класу з прив’язкою їх до пунктів нової триангуляції.

Були побудовані мережі триангуляції II і III класу на площі 220 км². В міську мережу увійшли пункти державної геодезичної мережі I кл. – 4; II кл. – 10; нових пунктів II кл. – 8 шт.; нових пунктів III кл. – 39 шт.

На основі міської триангуляції II і III кл., прокладеної в 1952 – 1953 рр. на території земель міст і селищ: Ігреня, Придніпровськ, Березанівка, Сухачівка, Таромське, Краснопілля і Лоц-Кам’янка, які включені у склад міських земель м. Дніпропетровськ на площі – 31 км², побудовані мережі полігонометрії: 1-го розряду – 29,6 км (118 пунктів); 2-го розряду – 26,5 км (84 пункти); теодолітних ходів – 34,7 км (78 пунктів).

У період з 1963 по 1978 р. виникла необхідність у виконанні основних робіт із розвитку триангуляції, полігонометрії, висотного обґрунтування і аерофотозйомки у масштабі 1 : 2 000 і 1 : 5 000. Полігонометричні ходи прокладені по всій забудованій території. Переспостережено 35 пунктів державної триангуляції [5].

У 2011 році ДП «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії» виконав комплекс геодезичних робіт із подальшої модернізації міської геодезичної мережі м. Дніпропетровськ (рис. 3).

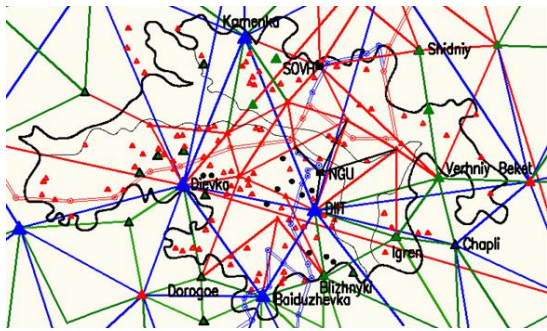


Рис. 3. Геодезична мережа 2012 р.[5]

Станом на 2013 рік було виявлено збереженість близько 60 % пунктів ДГМ і пунктів міської полігонометрії (162 пункти ДГМ I-IV класу, 32 пунктів міської полігонометрії).

Наразі постає завдання оцінити надійність сучасного стану ГМ.

Обчислимо доцільну періодичність моніторингу ГМ (систем) залежно від інтенсивності відмов геодезичних пунктів (елементів). Комплексний вплив різних факторів порушує природну рівновагу ґрунтового масиву і, як наслідок, викликає зміщення геодезичних знаків. Враховуючи те, що у створених умовах досягти 100 % надійності неможливо, приймемо ймовірність безвідмовної роботи ГМ принаймі 90 %, тобто $P(t) \geq 0,9$.

Розрахуємо максимально допустиму кількість геодезичних пунктів, які можуть зазнати зміщень і втратити стабільність свого положення. Нехай планово-висотна розмічувальна ГМ включає 10 пунктів, тоді із формули (5) знайдемо максимальну кількість пунктів, що втратили стає положення:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (5)$$

де N_0 – загальна кількість пунктів ГМ; $n(t)$ – кількість пунктів ГМ, які змістилися протягом деякого часу t .

Знайдемо максимальну кількість геодезичних пунктів, що можуть вийти з ладу зі збереженням надійного стану ГМ на рівні 90 %:

$$n(t) = N_0 \cdot (1 - P(t)) = 10 \cdot (1 - 0,9) = 1. \quad (6)$$

Отже, для забезпечення надійності ГМ допускається втрата стабільного положення лише одного пункту.

Розрахуємо, з якою періодичністю потрібно проводити моніторинг пунктів ГМ для своєчасного їх відновлення, якщо втрата надійності відбулась через $\Delta t = 6$ міс.

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{cpi} \cdot \Delta t_i}, \quad (7)$$

Для визначення періодичності контролю стану вихідних пунктів ГМ виведемо формулу:

$$t = -\frac{\ln P(t)}{\lambda}. \quad (8)$$

Якщо відбулась втрата надійності одного пункту через 5 місяців, то інтенсивність відмов буде:

$$\lambda = \frac{1}{(9,5 \cdot 5)} = 0,021.$$

Для такого значення інтенсивності відмов знайдемо доцільну періодичність моніторингу мережі:

$$t = \frac{-\ln 0,9}{0,021} \approx 5 \text{ міс.}$$

Дані з розподілу пунктів ДГМ м. Дніпро (Катеринослава 1802–1926 рр., Дніпропетровська 1926–2016 рр.) наведені у таблиці.

Таблиця

Геодезична мережа м. Дніпро

Роки	Триангуляція, клас			Σ
	I	II	III	
1911-1915	15	9	26	50
1915-1918	12	5	34	51
1927	18	28	56	102
1943-1953	4	10	39	53
1957	4	18	39	280
2013	пункти I-IV класу			162

Розглянемо інтервал часу 1927–1953 та 1957–2013 років. Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи ГМ та інтенсивність відмови на двох етапах: 1927–1953 та 1957–2013 рр. за формулою 5:

$$P(t)_{1927-1953} = \frac{102-49}{102} = 0,48;$$

$$P(t)_{1957-2013} = \frac{162 - 118}{162} = 0,27.$$

Розрахунки на період 1953–1957 рр. неможливо виконати у зв'язку з відновленням ГМ. Отже, ГМ у ці періоди була ненадійною внаслідок знищення геодезичних пунктів. Обчислимо інтенсивність відмови ГМ в ці періоди за формулою 7:

$$\lambda_{1927-1953} = \frac{49}{(77,5 \cdot 26)} = 0,024;$$

$$\lambda_{1957-2013} = \frac{118}{(221 \cdot 56)} = 0,001.$$

Періодичність контролю пунктів ГМ буде: $t = \frac{-\ln 0,9}{0,024} \approx 4,39$ років (тобто 1 раз у 4 роки).

Отже, якби виконали моніторинг у 1931 році та відновили ГМ, ймовірність безвідмовної роботи ГМ можна було б забезпечити на рівні 90 %. Як бачимо, протягом 26 років (1927–1953) було

втрачено близько 48 % пунктів, а протягом 1957–2013 рр. – 27 %.

Останнім часом все більше уваги приділяють використанню дедуктивного методу із застосуванням дерева відмов – стандартизованого методу, що широко застосовується в оцінюванні надійності.

Побудова дерева відмов лежить в основі логіко-ймовірнісної моделі причинно-наслідкових зв'язків відмов системи з відмовами її елементів та іншими подіями.

Дерево відмов, або дерево несправностей (Fault Tree) – це структурно-логічна схема, яка пов'язує головну подію (втрата надійності геодезичної мережі) з основними вхідними подіями (знищення геодезичних пунктів або їх зміщення, зміна їх планово-висотного положення внаслідок впливу різних факторів), які спричинили появу головної події. На рисунку 4 показано дерево несправностей ГМ.

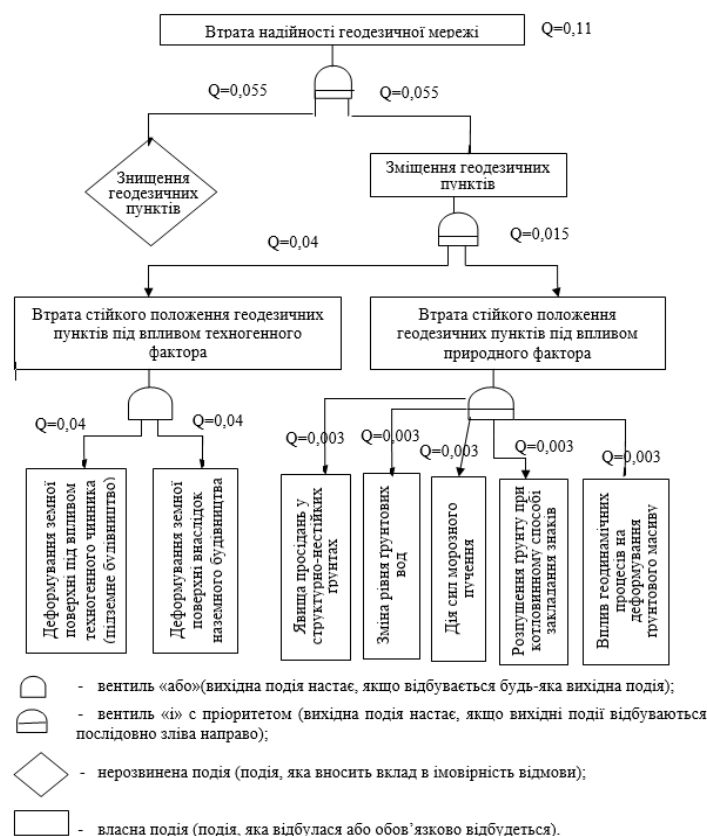


Рис. 4. Дерево несправностей геодезичної мережі

Втрата надійності ГМ настає, коли $P(t) < 0,9$, а отже $Q > 0,1$. Метод аналізу дерева сприяє ретельному аналізу причин відмов ГМ і вживанню заходів, найбільш

ефективних для їх усунення. Такий аналіз проводять для кожного періоду функціонування, кожної частини або системи в цілому.

Відповідно до рисунка 4 ГМ втратить надійність за ймовірності виходу із ладу системи $Q = 0,11$, що, у свою чергу, відбудеться у разі виході із ладу її елементів: знищенні ($Q = 0,055$) або зміщенні геодезичних пунктів ($Q = 0,055$).

Причиною настання таких подій може бути вплив техногенного фактора (наземного або підземного будівництва), а також комплексний вплив природного фактора.

Розглянемо випадок, коли система (геодезична мережа) складається з n елементів (геодезичних пунктів). У теорії булевої алгебри є тільки два стани системи: надійний (працездатний) та ненадійний (непрацездатний або стан відмови). Якщо позначити цифрами елементи системи від 1 до n і прийняти, що система не відновлюється, опис стану кожного з них можна зобразити у вигляді послідовного дерева відмов (рис. 5).

Як показує цей рисунок, на рівні 0 всі елементи надійні; на другому рівні відбулась відмова одного з n елементів, при цьому, за умови, що номер непрацездатного елемента невідомий, наведені всі можливі варіанти відмов.

На другому рівні відбулась відмова ще одного з елементів, отже кількість працездатних (надійних) елементів ще на одиницю менша. Загальна кількість рівнів відмови елементів системи – n , тобто на заключному рівні n система втрачає працездатність усіх її елементів, отже, надійність системи дорівнює 0.

Із послідовного дерева відмов можна дістати інформацію про черговість відмов елементів. Якщо елементи відмовили в послідовності 1, 2, n , то ця ситуація відповідає другому вузлу зліва на рівні 3 (рис. 5).

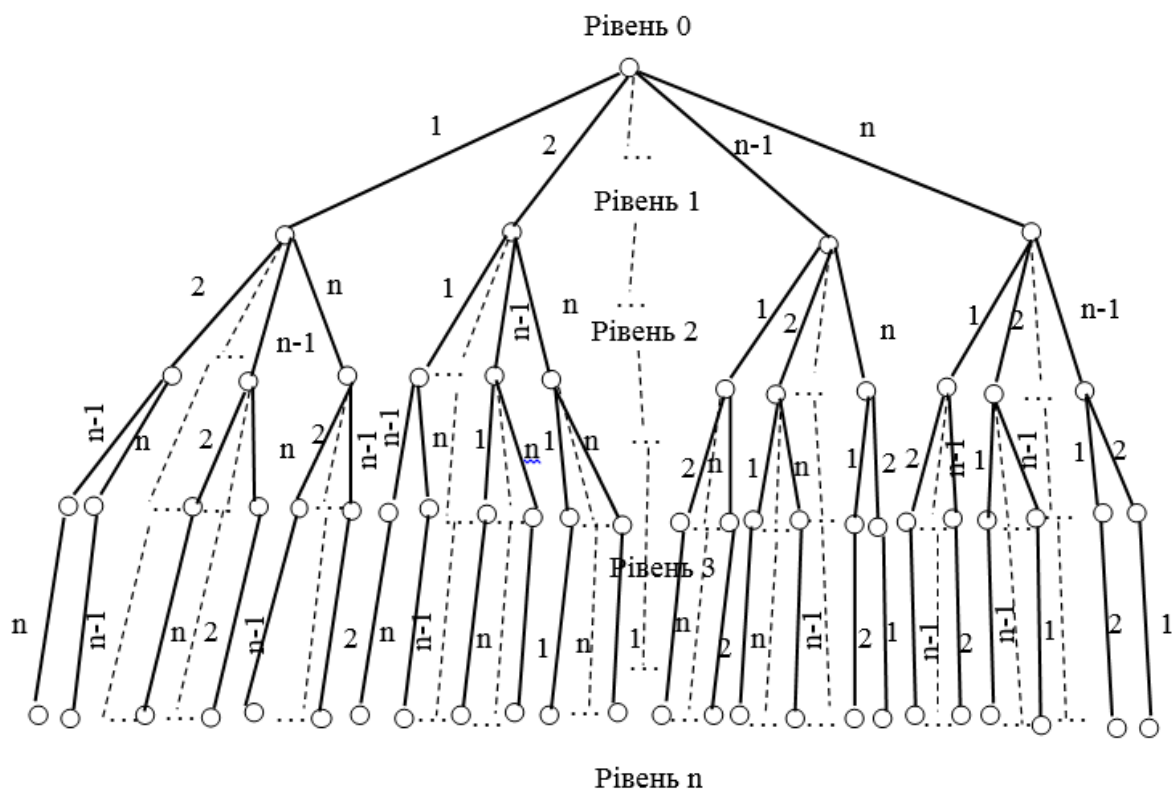


Рис. 5. Послідовне дерево відмов геодезичної мережі

У програмному засобі TopEvent FTA побудовано дерево відмов ГМ, що складалась із 5 пунктів (рис. 6), та ГМ, що включала 10 пунктів (рис. 7).

Для досягнення надійності мережі на рівні 90 % ($P(t) \geq 0,9$) у мережі, що включає 5 пунктів, недопустимий вихід із ладу хоч одного пункту.

Натомість у мережі, що включає 10 пунктів, при виході з ладу одного будь-якого елемента мережа залишається надійною. Проте вихід із ладу будь-яких

двох елементів (рис. 7) спричинює втрату надійності мережі (ймовірність виходу з ладу мережі $Q \geq 0,11$).

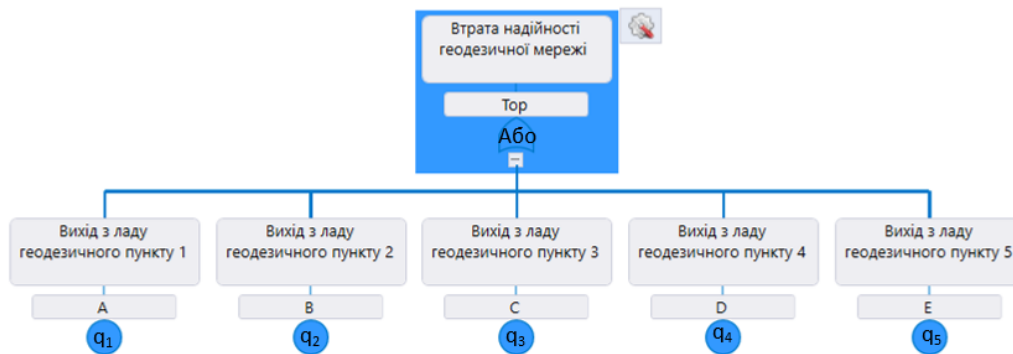


Рис. 6. Дерево відмов ГМ, що включає 5 пунктів

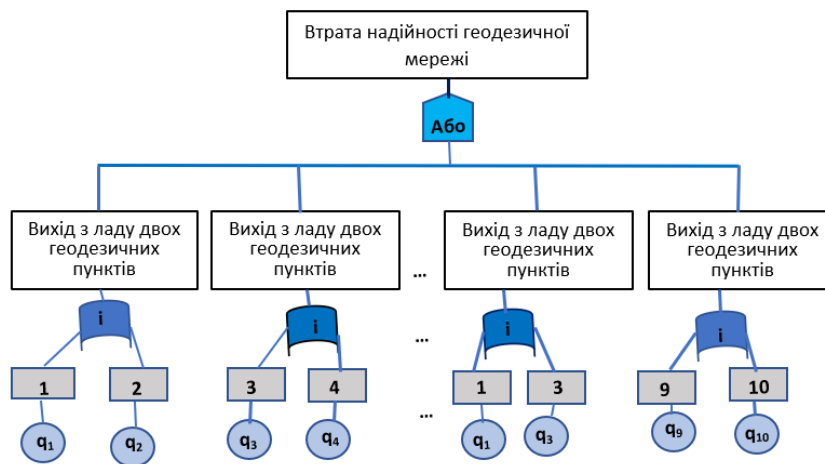


Рис. 7. Фрагмент дерева відмов ГМ, що включає 10 пунктів

Необхідно визначити багато чинників: загальну ймовірність небажаної події; комбінацію подій, які найбільш імовірно викличуть небажану подію; події, що найбільше сприяють цій комбінації, а також найбільш імовірні наслідки події чи шляхи до вершини дерева відмов. Основна перевага цього методу в тому, що ми можемо знайти слабкі місця нашої системи (ГМ).

Щоб знайти усі комбінації елементів, що відмовляють і спричиняють відмову всієї системи (ГМ) – функцію, яку отримують для верхньої події–рівень 0, потрібно мінімізувати. Набір диз'юнкцій – логічних додавань «або» (\vee) і кон'юнкцій – логічних множень «і» (\wedge) в результаті утворюють набір логічних норм, який буде визначати «слабкі місця».

Дерево відмов дає можливість отримати ймовірність відмови системи і мінімальні перерізи–сукупність подій, які повинні одночасно відбутися, щоб система вийшла з ладу. Визначення слабких місць відбувається шляхом мінімізації складеної логічної функції.

Функція $f_1(a, b)$ – кон'юнкція (логічне множення) істинна тоді, коли a і b – істинні. Кон'юнкцію називають також функцією «і»; умовно її позначають:

$$f_1(a, b) = a \cdot b = a \wedge b.$$

Функція $f_2(a, b)$ – диз'юнкція (логічне додавання) істинна тоді, коли істинними є або a , або b , або обидві змінні. Диз'юнкцію часто називають також функцією «або» й умовно позначають так: $f_2(a, b) = a + b = a \vee b$.

Запишемо логічну функцію основної події (відмови системи) у випадку, коли лише 5 пунктів у мережі (рис. 6):

$$Q = q_1 \vee q_2 \vee q_3 \vee q_4 \vee q_5.$$

Ймовірність виникнення цієї події буде:

$$Q = (q_1 \wedge q_2) \vee (q_1 \wedge q_3) \vee (q_1 \wedge q_4) \vee (q_1 \wedge q_5) \vee (q_1 \wedge q_6) \vee (q_1 \wedge q_7) \vee (q_1 \wedge q_8) \vee (q_1 \wedge q_9) \vee (q_1 \wedge q_{10}) \vee (q_2 \wedge q_3) \vee (q_2 \wedge q_4) \vee (q_2 \wedge q_5) \vee (q_2 \wedge q_6) \vee (q_2 \wedge q_7) \vee (q_2 \wedge q_8) \vee (q_2 \wedge q_9) \vee (q_2 \wedge q_{10}) \vee (q_3 \wedge q_4) \vee (q_3 \wedge q_5) \vee (q_3 \wedge q_6) \vee (q_3 \wedge q_7) \vee (q_3 \wedge q_8) \vee (q_3 \wedge q_9) \vee (q_3 \wedge q_{10}) \vee (q_4 \wedge q_5) \vee (q_4 \wedge q_6) \vee (q_4 \wedge q_7) \vee (q_4 \wedge q_8) \vee (q_4 \wedge q_9) \vee (q_4 \wedge q_{10}) \vee (q_5 \wedge q_6) \vee (q_5 \wedge q_7) \vee (q_5 \wedge q_8) \vee (q_5 \wedge q_9) \vee (q_5 \wedge q_{10}) \vee (q_6 \wedge q_7) \vee (q_6 \wedge q_8) \vee (q_6 \wedge q_9) \vee (q_6 \wedge q_{10}) \vee (q_7 \wedge q_8) \vee (q_7 \wedge q_9) \vee (q_7 \wedge q_{10}) \vee (q_8 \wedge q_9) \vee (q_8 \wedge q_{10}) \vee (q_9 \wedge q_{10}).$$

Ймовірність виникнення події відмови, що зображена на рисунку 7, буде у разі виходу із ладу будь-яких двох пунктів ГМ:

$$Q = 1 - (1 - q_1 \cdot q_2) \cdot (1 - q_1 \cdot q_3) \cdot (1 - q_1 \cdot q_4) \cdot (1 - q_1 \cdot q_5) \cdot (1 - q_1 \cdot q_6) \cdot (1 - q_1 \cdot q_7) \cdot (1 - q_1 \cdot q_8) \cdot (1 - q_1 \cdot q_9) \cdot (1 - q_1 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_2 \cdot q_3) \cdot (1 - q_2 \cdot q_4) \cdot (1 - q_2 \cdot q_5) \cdot (1 - q_2 \cdot q_6) \cdot (1 - q_2 \cdot q_7) \cdot (1 - q_2 \cdot q_8) \cdot (1 - q_2 \cdot q_9) \cdot (1 - q_2 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_3 \cdot q_4) \cdot (1 - q_3 \cdot q_5) \cdot (1 - q_3 \cdot q_6) \cdot (1 - q_3 \cdot q_7) \cdot (1 - q_3 \cdot q_8) \cdot (1 - q_3 \cdot q_9) \cdot (1 - q_3 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_4 \cdot q_5) \cdot (1 - q_4 \cdot q_6) \cdot (1 - q_4 \cdot q_7) \cdot (1 - q_4 \cdot q_8) \cdot (1 - q_4 \cdot q_9) \cdot (1 - q_4 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_5 \cdot q_6) \cdot (1 - q_5 \cdot q_7) \cdot (1 - q_5 \cdot q_8) \cdot (1 - q_5 \cdot q_9) \cdot (1 - q_5 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_6 \cdot q_7) \cdot (1 - q_6 \cdot q_8) \cdot (1 - q_6 \cdot q_9) \cdot (1 - q_6 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_7 \cdot q_8) \cdot (1 - q_7 \cdot q_9) \cdot (1 - q_7 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_8 \cdot q_9) \cdot (1 - q_8 \cdot q_{10}) \cdot (1 - q_9 \cdot q_{10}),$$

де $q_1, q_2 \dots q_{10}$ – логічні події, що спричинять вихід із ладу пунктів ГМ (внаслідок впливу природних або техногенних факторів).

У програмі TopEventFTA обчислюємо ймовірності відмови ГМ та її елементів, для

$$Q = 1 - (1 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5).$$

Запишемо логічну функцію та ймовірність основної події у випадку, коли вийдуть із ладу 8 пунктів ГМ із 10 пунктів (рис. 7):

цього обираємо метод обчислень (МТТА) і вводимо середній час до настання відмови кожного пункту (рис. 8).

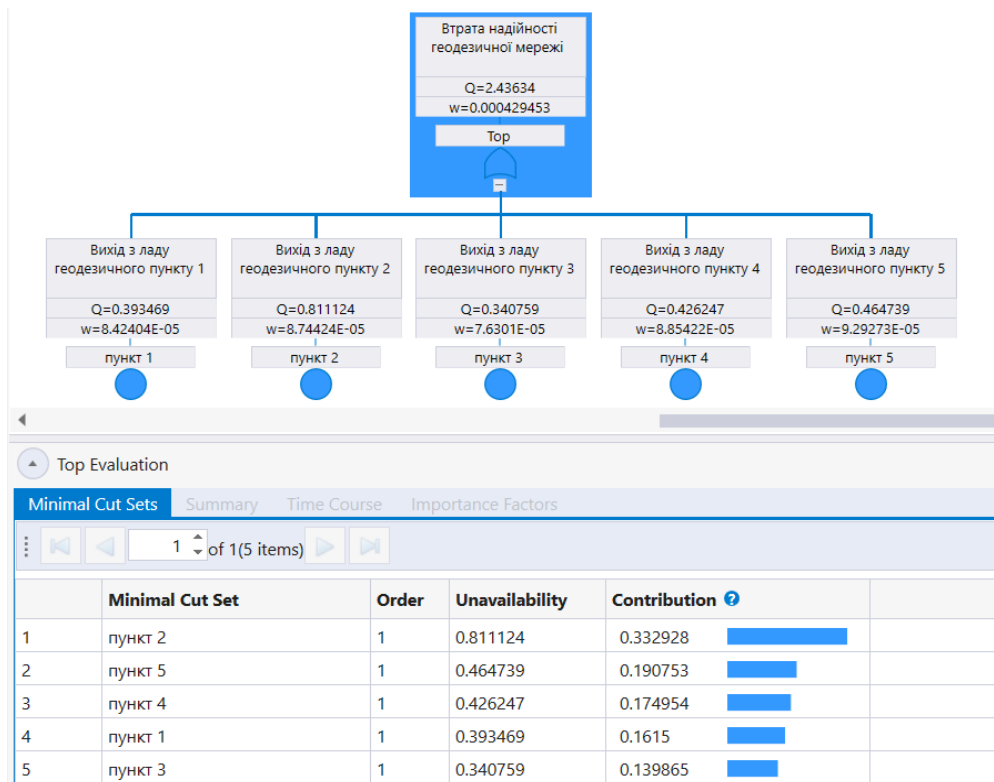


Рис. 8. Виявлення мінімальних перерізів побудованого дерева відмов

Відповідно до рисунка 8, найбільша ймовірність виходу з ладу ГМ буде на основі виходу з ладу найменш стабільного геодезичного пункту 2.

Аналогічні структурні схеми (дерева відмов) з описом логічних функцій та ймовірностей виникнення основної події (відмова системи) можна записати для геодезичної мережі, що включає будь-яку кількість геодезичних пунктів.

Висновки та перспективи розвитку напрямку

Дерево відмов – це логіко-ймовірнісна модель, структурно-логічна схема, яка відображає процедуру втрати працездатності (надійності) у вигляді логічних зв'язків між початковими (базовими) подіями. Базові події – це відмова елементів (геодезичних пунктів), а основна подія – це вихід із ладу геодезичної мережі.

Дерево відмов будується дедуктивним методом зверху вниз, на основі якого складається логічна функція непрацездатності. За допомогою методів алгебри логіки виконуємо її мінімізацію. Здійснюється перехід від логічних подій до

ймовірностей. Важливе знаходження мінімальних перерізів – «слабких місць», які показують, вихід із ладу яких комбінацій геодезичних пунктів мережі спричинить втрату надійності ГМ. Сукупність таких слабких місць і буде фактичною ймовірністю відмови.

Для підсумку виконаних досліджень слід зазначити низку важливих моментів:

- надійність геодезичних пунктів впливає на достовірність результатів геодезичних і кадастрових робіт;
- застосування дедуктивного методу з побудовою структурно-логічної схеми у вигляді «дерева відмов» дозволяє виявити «слабкі місця» геодезичної мережі;
- застосування сучасних програмних засобів оцінки надійності (TopEventFTA, ALD Fault Tree Analyzer, FDiTA) дозволяє побудувати дерева відмов, обчислити ймовірність відмови системи та її елементів, виявити мінімальні перерізи на основі функцій алгебри логіки;
- для підвищення надійності можна ввести надлишковість елементів ГМ, своєчасно відновлювати геодезичні пункти за результатами моніторингу, тобто

забезпечувати надійність (стабільність) більш надійними всі елементи одночасно певних елементів системи, а не замінювати

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>
2. Порядок побудови Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9>
3. Порядок обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text>
4. Надійність. URL: <http://surl.li/pqzff>
5. Ішутіна Г. С. Оцінювання надійності геодезичної мережі при геомоніторингу забудованих територій : дис... к-та техн. наук : 05.24.01. Київ : Київський нац. ун-т будівн. та арх., 2015. 187 с.
6. Третяк К. Р., Савчин І. Р. Розроблення методики розрахунку надійності активних моніторингових геодезичних мереж. *Вісник геодезії та картографії*. 2013. № 1. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2013_1_5
7. Savchyn Ihor, Tretyak Korneliy. Research of reliability of active geodetic network for deformation monitoring of of hydro power plants (HPPs). *Conference: XXIII-d international symposium modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields*. № 23. Sofia, Bulgaria, 2013. URL: <http://surl.li/tsppd>
8. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25034
9. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53946
10. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99060
11. ДСТУ 2864-94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77857
12. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51308
13. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93624
14. Gilad Even-Tzur. Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. *Zeitschrift fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement, ZFV*. 2006. № 131 (2). Pp. 87–95 URL: <http://surl.li/tspqk>
15. Marcelo Tomio Matsuoka, Vinicius Francisco Rofatto, Ivandro Klein, Mauricio Roberto Veronez, Luiz Gonzaga da Silveira Jr., João Batista Silva Neto and Ana Cristina Ramos Alves. Control Points Selection Based on Maximum External Reliability for Designing Geodetic Networks. *Applied Sciences*, 2020. № 10 (2). URL: <http://surl.li/tsprc>
16. Waldemar Odziemczyk Comparison of selected reliability optimization methods in application to the second order design of geodetic network. *Journal of Applied Geodesy*, 2023. URL: <http://surl.li/tsprw>

REFERENCES

1. *Zakon Ukrainy "Pro topografo-heodezychnu i kartohrafichnu diialnist"* [Law of Ukraine "On topographical, geodetic and cartographic activities"]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text> (in Ukrainian).
2. *Poriadok pobudovy Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [The procedure for building the State geodetic network]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#n9> (in Ukrainian).
3. *Poriadok obstezhennia ta onovlennia punktiv Derzhavnoi heodezychnoi merezhi* [The procedure for surveying and updating points of the State geodetic network]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text> (in Ukrainian).
4. *Nadiynist'* [Reliability]. URL: <http://surl.li/pqzff> (in Ukrainian).
5. Ishutina H.S. *Otsynuvannya nadiynosti heodezychnoyi merezhi pry heomonitorynhu zabudovanykh terytoriy : dys... kand. tekhn. nauk : 05.24.01* [Evaluation of the geodetic network reliability at geomonitoring of built-up territories : diss... Cand. Sc. (Tech.) : 05.24.01]. Kyiv, 2015, 187 p. (in Ukrainian).
6. Tretyak K.R. and Savchyn I.R. *Rozroblennia metodyky rozrakhunku nadiynosti aktyvnykh monitorynhovykh heodezychnykh merezh* [Development of a methodology for calculating the reliability of active monitoring geodetic networks]. *Visnyk heodezii ta kartohrafii* [Herald of Geodesy and Cartography] 2013, no. 1, pp. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2013_1_5 (in Ukrainian).
7. Savchyn Ihor and Tretyak Korneliy. Research of reliability of active geodetic network for deformation monitoring of of hydro power plants (HPPs). *Conference: XXIII-d international symposium modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields*. 2013, no. 23, Sofia, Bulgaria. URL: <http://surl.li/tsppd>

8. DSTU 2860-94 *Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia* [Reliability of equipment. Terms and definitions]. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25034 (in Ukrainian).
9. DSTU 2862-94 *Nadiinist tekhniky. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy* [Reliability of equipment. Methods of calculating reliability indicators. general requirements]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53946 (in Ukrainian).
10. DSTU 2863-94. *Nadiinist tekhniky. Prohrama zabezpechennia nadiinosti. Zahalni vymohy* [Reliability of equipment. Reliability program. General requirements]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99060 (in Ukrainian).
11. DSTU 2864-94. *Nadiinist tekhniky. Eksperymentalne otsiniuvannia ta kontrol nadiinosti. Osnovni polozhennia.* [Reliability of equipment. Experimental assessment and reliability control. Substantive provisions]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77857 (in Ukrainian).
12. DSTU 3004-95. *Nadiinist tekhniky. Metody otsinky pokaznykiv nadiinosti za eksperymentalnymy danymy* [Reliability of equipment. Methods of estimating reliability indicators based on experimental data]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51308 (in Ukrainian).
13. DSTU 3433-96. *Nadiinist tekhniky. Modeli vidmov. Osnovni polozhennia* [Reliability of equipment. Failure models. Substantive provisions]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93624 (in Ukrainian).
14. Gilad Even-Tzur. Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. *Zeitschrift fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement, ZFV*. 2006, no. 131 (2), pp. 87–95. URL: <http://surl.li/tspqk>
15. Marcelo Tomio Matsuoka, Vinicius Francisco Rofatto, Ivandro Klein, Mauricio Roberto Veronez, Luiz Gonzaga da Silveira Jr., João Batista Silva Neto and Ana Cristina Ramos Alves. Control Points Selection Based on Maximum External Reliability for Designing Geodetic Networks. *Applied Sciences*. 2020, no. 10 (2). URL: <http://surl.li/tsprc>
16. Waldemar Odziemczyk. Comparison of selected reliability optimization methods in application to the second order design of geodetic network. *Journal of Applied Geodesy*. 2023. URL: <http://surl.li/tsprw>

Надійшла до редакції: 13.04.2024.

УДК 725:69.059.28

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.48.1058

АНАЛІЗ РУЙНУВАНЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНО-ПАЛИВНОГО ЦИКЛУ УКРАЇНИ ВНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ РФ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ПИЛИПЕНКО О. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ШАЛОМОВ В. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,
САНЬКОВ П. М.⁴, *канд. техн. наук, проф.*,
ТИМЧЕНКО П. О.⁵, *асп.*,
РУДЕНКО В. П.⁶, *асп.*

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9644-3118

³ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

⁴ Кафедра архітектури, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 149-85-41, e-mail: petsrankov5581@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0898-7992

⁵ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: tumchenko.pavlo@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-9362-3471

⁶ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: rudenko.vacheslav@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0000-6641-8002

Анотація. Постановка проблеми. У зв'язку з постійними терористичними атаками рф по об'єктах енергетики України заподіяно руйнування енергетичної системи, що спричинило її знеструмлення і, через це, вилучило відключення по всій території країни. Знищення енергетичних потужностей зумовило нестабільну роботу окремих підрозділів критичної інфраструктури з вироблення електроенергії на теплових, атомних та гідроелектростанціях і введення вимушених графіків погодинного відключення електроенергії. Загарбання Чорнобильської атомної електричної станції (АЕС), окупація та повний контроль Запорізької АЕС та Запорізької теплової електричної станції (ТЕС). Повне руйнування Каховської гідроелектростанції (ГЕС), часткове руйнування Дніпровської, Дністровської та Канівської ГЕС. Через війну пошкоджено Криворізьку та Придніпровську ТЕС, повністю зруйновані Луганська (90–100 %), Вуглегірська (90–100 %), Зміївська ТЕС (до 90 %), майже повністю зруйновані Бурштинська (80–90 %) та Ладизинська ТЕС (70–95 %). **Мета статті** полягає у виявленні та аналізі пошкоджень ТЕС, ГЕС та АЕС України, через воєнні дії рф проти України та визначенні можливих наслідків для ядерно-паливного циклу (ЯПЦ) нашої держави і можливі перспективи переходу до нових ядерних реакторів європейських та світових виробників паливних елементів, для удосконалення обладнання та стабілізації на енергетичному ринку в умовах ведення бойових дій. **Висновок.** У ході аналізу потенційних небезпек на радіаційнонебезпечних об'єктах (РНО) України визначено, що основну загрозу становлять аварії на РНО з викидом радіаційної речовини в атмосферу, літосферу та гідросферу. Через захват ворогами Чорнобильської та Запорізької АЕС проведення вимірів стандартними методами дослідження, скринінгу та моніторингу неможливе, доступ представників МАГАТЕ обмежений. Саме тому слід застосовувати новітні методи проведення вимірювань з використанням автономних дистанційно-керованих наземних, надводних та повітряних дронів в автоматичному об'єктовому або вибіркового вимірюванні радіаційних параметрів на РНО. Використання автономних апаратів (дронів) стало наразі найактуальнішим питанням радіаційної безпеки не тільки атомної енергетики, а й усього ЯПЦ як частини екологічної безпеки України. У випадку загарбання ядерного об'єкта чи обмеженого доступу до нього треба змінити й методи досліджень. Якщо об'єкт захоплено частково чи до нього є доступ, тоді можна застосовувати експрес-методи реєстрації радіаційного забруднення або метод забору проб і в подальшому – метод лабораторних досліджень. Проте якщо АЕС або об'єкт, що входять до ядерно-паливного циклу України, захоплені і доступ до нього неможливий, залишаються тільки методи дистанційного вимірювання радіаційної обстановки на ядерних об'єктах і навколо них, за допомогою наземних та повітряних автономних апаратів. Для подальших досліджень необхідно виявити технічні можливості щодо використання власних копалин, що є в Україні, та перехід із радянських реакторів типу РБМК-1000, ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 з паливними елементами, які поставляються нам з рф, на більш сучасні типи реакторів європейського та американського виробництва з відповідними елементами завантаження.

Ключові слова: енергетичні об'єкти; потенційні небезпеки; радіаційна безпека; ядерно-паливний цикл, екологічні наслідки; бойові дії; обстріли; тероризм

ANALYSIS OF THE DESTRUCTION OF UKRAINIAN NUCLEAR FUEL CYCLE ENERGY FACILITIES AS A RESULT OF RUSSIAN MILITARY OPERATIONS

BELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.)*, *Prof.*,
PYLYPENKO O.V.^{2*}, *Cand. Sc.(Tech.)*, *Assoc. Prof.*,
SHALOMOV V.A.³, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Assoc. Prof.*,
SANKOV P.M.⁴, *Cand. Sc.(Tech.)*, *Prof.*,
TYMCHENKO P.O.⁵, *Postgraduate Stud.*,
RUDENKO V.P.⁶, *Postgraduate Stud.*

¹ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9644-3118

³ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

⁴ Department of Architecture, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 149-85-41, e-mail: petrsankov5581@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0898-7992

⁵ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: tumchenko.pavlo@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-9362-3471

⁶ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: rudenko.vacheslav@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0000-6641-8002

Abstract. Problem statement. Due to Russia's ongoing terrorist attacks on Ukraine's energy facilities, the energy system was damaged, resulting in blackouts and rolling blackouts across the country. The destruction of power capacities resulted in the unstable operation of certain critical infrastructure units for electricity generation at thermal, nuclear and hydroelectric power plants and the introduction of forced hourly blackout schedules. Seizure of the Chornobyl Nuclear Power Plant, occupation and full control of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant and the Zaporizhzhia Thermal Power Plant (TPP). Complete destruction of the Kakhovka hydroelectric power station (HPP), partial destruction of the Dnipro HPP, Dniester HPP and Kaniv HPP. During the hostilities, Kryvyi Rih and Prydniprovsk TPPs were damaged, Luhansk TPP (90–100 %), Vuhlehirsk TPP (90–100 %), Zmiiv TPP (up to 90 %) were completely destroyed, Burshtyn TPP (80–90 %) and Ladyzhyn TPP (70–95 %) were almost completely destroyed. **The purpose of the article** is to identify and analyse the damage to Ukrainian TPPs, HPPs and NPPs caused by the Russian military actions against Ukraine and to determine possible consequences for the nuclear fuel cycle of our country and possible prospects for the transition to new nuclear reactors of European and global fuel cell manufacturers, to improve equipment and stabilise the energy market in the context of military operations. **Conclusion.** In the course of the analysis of potential hazards at radiation hazardous facilities (RHF) in Ukraine, it was determined that the main threat is accidents at RHF with release of radiation into the atmosphere, lithosphere and hydrosphere. In the light of recent events regarding the military seizure of the Chornobyl NPP and Zaporizhzhia NPP, measurements using standard methods of research, screening and monitoring are not possible, and access of IAEA representatives is limited, which is why the latest measurement methods should be used with the use of autonomous remote-controlled ground, surface and air drones in automatic object or sample measurement of radiation parameters at RNS. It is the use of autonomous vehicles (drones) that is currently the most pressing issue of radiation safety not only in the nuclear power industry but also in the entire nuclear fuel cycle as part of the environmental safety of Ukraine. In case of seizure of a nuclear facility or limited access to it, research methods should be changed. If the facility is partially seized or access is available, then express methods of radiation contamination registration or sampling can be used and the method of laboratory research can be used in the future. However, if a nuclear power plant or a facility that is part of the nuclear fuel cycle of Ukraine is captured and access to it is impossible, then only methods of remote measurement of the radiation situation at and around nuclear facilities using ground and airborne autonomous vehicles remain. For further research, it is necessary to identify technical possibilities for using Ukraine's own mineral resources and switching from Soviet RBMK-1000, VVER-440 and VVER-1000 reactors with fuel elements supplied to us from the Russian Federation to newer types of European and American reactors with appropriate fuel elements.

Keywords: *energy facilities; potential hazards; radiation safety; nuclear fuel cycle, environmental consequences; hostilities; shelling; terrorism*

Постановка проблеми. У зв'язку з постійними терористичними атаками рф по об'єктах енергетики України заподіяно руйнування енергетичній системі, що зумовило її знеструмлення і, через це, віялові відключення по всій території країни. Знищення енергетичних потужностей спричинило нестабільність роботи окремих підрозділів критичної інфраструктури з вироблення електроенергії на теплових, атомних та гідроелектростанціях і введення вимушених графіків погодинного відключення електроенергії.

Захоплення Чорнобильської атомної електричної станції (АЕС), окупація та повний контроль Запорізької АЕС та Запорізької теплової електричної станції (ТЕС). Повне руйнування Каховської гідроелектростанції (ГЕС), часткове руйнування Дніпровської, Дністровської та Канівської ГЕС. Ворог пошкодив Криворізьку та Придніпровську ТЕС, зазнали повного руйнування Луганська (90–100 %), Вуглегірська (90–100 %), Зміївська ТЕС (до 90 %), майже повністю зруйновані Бурштинська (80–90 %) та Ладижинська ТЕС (70–95 %) (станом на 1 квітня 2024 року).

Аналіз публікацій. В Україні масовані обстріли ГЕС можуть їх зруйнувати, що матиме катастрофічні наслідки для життя українців і довкілля, адже зруйнована гребля може затопити землі та населені пункти далеко вниз по течії. Використання води як інструменту для досягнення військових цілей – не нове явище. Наприклад, під час Другої світової війни радянська влада спеціально підірвала ДніпроГЕС, щоб не «пустити» німецькі війська далі на Схід і потопити ворожі підрозділи, які розташовувались у плавнях.

Прорив будь-якої греблі за руйнівними наслідками, зокрема екологічними, можна порівняти із вибухом атомної бомби, бо греблі повинні стримувати мільйони тонн води. Цих сил достатньо, щоби руйнувати бетон. Наслідки від руйнування гребель так само розраховуються по зонах, як і наслідки від підриву ядерних бомб. У 1-й зоні ураження вода змітає геть усе: бетонні

споруди, будівлі, будь-які укріплення. Науковці називають це «зоною катастрофічного затоплення», тобто це територія, де можуть загинути люди, тварини, рослини та завдано шкоди об'єктам економіки й довкілля.

Мета дослідження полягає у виявленні та аналізі пошкоджень ТЕС, ГЕС та АЕС, внаслідок воєнних дій рф проти України та визначенні можливих наслідків для ядерно-паливного циклу (ЯПЦ) нашої держави і перспектив переходу до нових ядерних реакторів європейських та світових виробників паливних елементів, для удосконалення обладнання та стабілізації на енергетичному ринку в умовах ведення бойових дій.

Через масовані руйнування об'єктів цивільної, промислової та енергетичної інфраструктури виникає одне з базових завдань, а саме проведення обстежень, досліджень та оцінювання руйнувань пошкоджених об'єктів.

Результати досліджень. 28 червня 2022 року війська рф випустили шість ракет на Дніпропетровщину, а саме по Криворізькій ТЕС у м. Зеленодольську (рис. 1). За даними Дніпропетровської ОВА [1], через «прильоти» зруйновано залізничну інфраструктуру та промислове підприємство. За чотири місяці ворог випустив близько 160 ракет різних типів по Дніпропетровській області, з яких чверть була спрямована саме на енергетичні об'єкти інфраструктури та життєзабезпечення.

Криворізька ТЕС розташована на території Дніпропетровської області. Будівництво здійснювалося у три черги блоками 300 МВт: перша – блоки № 1 – 4, друга – блоки № 5 – 8, третя – блоки № 9 – 10. Перший головний енергоблок введено в експлуатацію у 1965-му, останній – у 1973 році. Проектне паливо – пісне вугілля, резервне – мазут, газ. Електрична енергія видається напругою 150 та 330 кВ з відкритих розподільчих пристроїв. У 2019 році енергоблок № 1 переведено на спалювання вугілля марки Г. Станом на

01.01.2021 р. встановлена потужність Криворізької ТЕС – 2 079 МВт.



Рис. 1. Криворізька ТЕС

Ракетний удар ворожими військами 22 березня 2024 року став однією з найпотужніших атак на енергосистему України за увесь час повномасштабного вторгнення рф. Зміївську ТЕС, одну з найбільших ТЕС України (рис. 2), виведено з ладу, жодний з енергоблоків не працює, розбір завалів може тривати тиждень, а її ремонт затягнеться на два роки, за умов постачання досить специфічного обладнання [3]. 22 березня росіяни масовано обстріляли м. Харків, що спричинило повний блекаут того ж дня. У ніч на 29 березня російські окупаційні війська завдали масованої комбінованої атаки по енергетичній інфраструктурі Харківської області та України в цілому.



Рис. 2. Зміївська ТЕС

З 1 липня 2002 року Бурштинська ТЕС була відокремлена від об'єднаної енергосистеми України і працювала у складі «Бурштинського острова» паралельно з об'єднаною енергетичною системою європейських країн (UCTE). Робота у межах «острова» вимагала завантаження до дев'яти енергоблоків станції, тоді як перед тим на

станції працювало не більше шести енергоблоків. Приєднання до енергетичної системи європейських країн відкрило широкі можливості для збільшення експортних поставок електроенергії з України. З приєднанням енергосистеми України до ENTSO-E станція знову опинилась у складі об'єднаної енергосистеми України, 12 енергоблоків (потужністю по 200 МВт кожний) були введені в експлуатацію в 1965–1969 роках. Завдяки вдалому географічному розташуванню і зараз два–три енергоблоки постійно працюють на експорт.



Рис. 3. Бурштинська ТЕС

22 березня 2024 року Бурштинська ТЕС (рис. 3.), що в Івано-Франківській області, зазнала масштабного обстрілу з боку військ рф. Ми втратили 50 % встановленої потужності. Постраждали усі блоки ТЕС. Виконавчий директор ДТЕК зазначив, що енергоблоки перебувають у різному ступені руйнації: від повної до понад 50 %. Це означає, що станція зазнала дуже серйозних руйнувань і потребує навіть не місяців, а років відновлення. Можливо, один-два блоки почнуть працювати раніше, але загалом це від 12 до 24 місяців ремонтних робіт [2].

Бурштинська ТЕС піддавалася обстрілам тричі: під час обстрілу українських міст 10 жовтня 2022 року 4 ракети влучили у відкриті розподільчі пристрої. Як наслідок, в енергомережі Івано-Франківської області різко знизилася напруга й Обленерго регулювало графіки електропостачання. Споживачі області були забезпечені електрикою повністю.

19 жовтня 2022 року станція знову зазнала ракетного обстрілу, через влучання ворожих ракет спалахнула пожежа, на

щастя, минулось без жертв. Станція була тимчасово відключена від енергосистеми [4]. 22 березня 2024 року Бурштинська ТЕС втратила ворожого ракетного обстрілу, в результаті чого пошкоджено усі блоки станції.

Також цього дня [2] російські окупанти двічі атакували Ладизинську теплоелектростанцію у Вінницькій області (рис. 4). Війська РФ запустили два дрони-камікадзе. Унаслідок цієї атаки є постраждалі.

Ладизинська ТЕС зазнала повторного удару російських терористичних військ, який відбувся у той момент, коли на місці працювали рятувальники ДСНС, на жаль були постраждалі (за попередньою інформацією – шість осіб).



Рис. 4. Ладизинська ТЕС

Ладизинська ТЕС розташована у м. Ладизин, Вінницької області закладена у 1968 році, введена в експлуатацію у 1970 р., будівництво завершилося у 1972 р., з 2012 року стала структурним підрозділом ДТЕК «Західенерго». Електростанція має шість енергоблоків потужністю 300 МВт кожен. У 2003 році ТЕС включено до переліку особливо важливих об'єктів електроенергетики України і передано під воєнізовану охорону у взаємодії зі спеціалізованими підрозділами МВС України.

Завантаження потужностей станції відбувається на основі енергобалансу електроенергетичної системи України. Станція з'єднана лініями електропередач напругою 330 кВ із південними і центральними регіонами України. За 2014 рік Ладизинська ТЕС виробила 5,4 млрд кВт·год, це один із найбільших

показників обсягу електроенергії, виробленої цією ТЕС з 2000 року.

24–26 лютого 2022 року, протягом перших днів повномасштабного вторгнення ворожих військ не вщухали обстріли Луганської ТЕС, яка знаходилася поряд із лінією розмежування у м. Щастя. Пошкоджено трансформатор зв'язку, у результаті чого на території станції виникло загоряння. Пожежу неможливо було локалізувати через постійні обстріли. Крім того, були пошкоджені будівлі навчального корпусу, кисневої станції і блоків № 10 і № 15.

Луганська ТЕС – найбільший виробник електричної енергії в Луганській області. Від її надійної роботи залежить енергозабезпечення стратегічних підприємств та об'єктів критичної інфраструктури, шкіл, дитсадків, медичних установ тощо, а також теплозабезпечення мешканців міста [5].



Рис. 5. Луганська ТЕС

Вуглегірська ТЕС (Донбаська № 1), розташована у м. Світлодарськ Донецької області (рис. 6). Встановлена потужність ТЕС складає близько 3 600 МВт, що виробляють сім енергоблоків станції. Проектне паливо: для енергоблоків 300 МВт – вугілля; для енергоблоків 800 МВт – газ. Частка використання природного газу в структурі палива у 2007 році енергоблоками 300 МВт становила 1,98 %.

На початку серпня 2015 року в результаті бойових дій були зруйновані повітряні лінії електропередачі напругою 330 кВ Вуглегірської ТЕС. Відновити їх та підключити ТЕС до енергосистеми вдалось 7 серпня 2015 року, а у серпні 2016 року снаряди російських найманців знову

влучили в цей об'єкт, зруйнували резервуар питної води та пошкодили лабораторію з контролю очистки та якості води.



Рис. 6. Вуглегірська ТЕС

10 березня 2022 року обстрілами пошкоджено газогін-відвід до ГРС Вуглегірської ТЕС. Відновити його роботу вдалось лише 18 березня 2022 року. Ворожі війська 12 червня 2022 року завдали два удари ракетами типу Х-22 по селу Миколаївка Покровського району Донецької області. У результаті цих ударів, серед усього іншого, сильно пошкоджено адміністративну будівлю Вуглегірської ТЕС, залізничне полотно, автомобіль «швидкої допомоги», лінії електропередач тощо. Без світла залишилися міста Бахмут і Красногорівка [6]. Місто Світлодарськ було захоплене російськими військовими ще на початку літа, проте територію Вуглегірської ТЕС збройні сили України контролювали аж до серпня 2022 року.



Рис. 7. Придніпровська ТЕС

Не уникла обстрілів й Придніпровська ТЕС (рис. 7). Будівництво ТЕС почалося ще у 1951 році, на захід від козацького селища Чаплі, та на момент спорудження вона була найпотужнішою у колишньому СРСР. Перший енергоблок потужністю 100 МВт ввели в експлуатацію 28 грудня 1954 року й

упродовж кількох наступних років розвиток станції відбувався за рахунок блоків саме такої ж потужності.

За період з 1964 по 1966-й щороку вводилось по одному об'єкту 300 МВт, що довело загальну потужність станції до 2 400 МВт, а це у чотири рази перевищувало потужність ДніпроГЕСу. Крім того це був найбільший показник серед теплових електростанцій України до завершення будівництва Запорізької ТЕС.

Окупація Чорнобильської АЕС тривала з першого дня повномасштабного вторгнення військ РФ, з 24 лютого 2022 року – до виведення ворожих формувань з території Київської області 2 квітня 2022 року. Тобто Чорнобильська АЕС була першим ядерним об'єктом та першою АЕС, яка була захоплена під час війни однієї країни проти іншої, в сучасних реаліях. Окупація Чорнобильської АЕС тривала 37 днів.



Рис. 8. Запорізька АЕС

Загарбання Запорізької АЕС, сталося уже після окупації Чорнобильської АЕС, а саме 3 березня 2022 року, о 23:28 за місцевим часом. До електростанції під'їхала колона з 10 одиниць російської бронетехніки та двох танків. Бої за м. Енергодар почалися 4 березня 2022 року. За повідомленням часопису «Українська правда» від 12 березня 2022 року, влада РФ заявила керівництву станції, що тепер Запорізька АЕС належить державній атомній енергетичній компанії Росії – «росатом». Нею продовжує керувати український персонал під контролем військових та фахівців РФ.

26 квітня дві російські крилаті ракети пролетіли на низькій висоті над майданчиком Запорізької АЕС у напрямку Запоріжжя. В Енергоатомі України цю подію кваліфікували як ядерний тероризм, що наражає світ на небезпеку повторення ядерної катастрофи.

Запорізька атомна електростанція розташована на південному сході України

(це найбільша атомна електростанція в Європі) та входить до 10 найбільших у світі. Вона побудована ще за часів Радянського Союзу поблизу м. Енергодар. Станція має шість ядерних реакторів типу ВВЕР-1000 (рис. 8), кожен із яких працює на збагаченому урані (235U) і генерує 950 МВт, із загальною вихідною потужністю 5 700 МВт. Перші п'ять енергоблоків були послідовно введені в мережу між 1985 і 1989 роками, а шостий доданий у 1995 році.

Станція виробляє майже половину електроенергії країни, отриманої від атомної енергетики, і понад п'яту частину загальної електроенергії, виробленої в Україні [7]. Поруч розташована Запорізька ТЕЦ. Окупація Запорізької АЕС та Запорізької ТЕЦ продовжується вже понад два роки.



Рис. 9. Підрив Каховської ГЕС

6 червня 2023 року ворожі війська зруйнували греблю Каховської ГЕС, підірвавши зсередини 11 із 28 прольотів греблі (рис. 9). Орієнтовна ширина прорану

склала понад 170 м. Протягом 5–6 годин мільйони кубометрів води хлинули на нижче розташовані населені пункти Херсонської області, протягом двох тижнів Каховське водосховище повністю спорожніло. У зону затоплення потрапило близько 80 населених пунктів. Загибло та пропало безвісті понад 20 осіб. Ефект скорочення оброблюваних площ та зниження урожайності триватиме протягом наступних 2024-2028 років, завдано шкоди довіллю України на мільярди гривень. Це перший акт екологічного тероризму за останні 50 років.

Руйнування одного з найбільших водосховищ спричинить також спустошення багатьох зрошувальних каналів, з яких найбільшими були Каховський, Дніпро–Кривий Ріг та Північнокримський. Зникнуть річкові порти та елеватори, дороги, залізниці. Масштаби і наслідки руйнувань будуть катастрофічними для регіону.

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України [8] анонсувало рівні використання Каховського водосховища, де зазначило, що падіння рівня нижче відмітки в 12,7 м призведе до екологічної та радіаційної катастрофи не лише в Україні, а й у низці інших країн, таких як: Туреччина, Болгарія, Румунія, Угорщина та ін. (рис. 10).



Рис. 10. Рівні небезпек для Каховської ГЕС

22 березня 2024 року армія РФ завдала вісім ударів по Дніпровській ГЕС у м. Запоріжжі (рис. 11). Через цей обстріл дві станції гідроелектростанції (ГЕС-1 та ГЕС-2) виведені з ладу. Крім того, екологічні інспектори зафіксували витік нафтопродуктів у р. Дніпро та велику кількість уламків греблі.



Рис. 11. Руїнування «тіла» Дніпровської ГЕС 22 березня 2024 року

25 березня 2024 року гендиректор ПрАТ «Укргідроенерго» Ігор Сирота повідомив, що внаслідок атаки на ДніпроГЕС енергосистема України втратила понад тисячу мегават потужності, а рятувальні служби й досі розбирають завали одного з машинних залів станції. В Укргідроенерго зазначили, що на відновлення ДніпроГЕС потрібні роки. Щодо рівня засмічення ґрунтів поблизу однокамерного шлюзу греблі Дніпровської ГЕС у місці захаращення уламками від вибуху були відібрані проби ґрунту і, за попередніми даними Держекоінспекції, зафіксовано засмічення ґрунтів та пляму нафтопродуктів орієнтовною масою 0,5 т, яка рухається нижче за течією Дніпра.

Орієнтовна сума збитків, завданих внаслідок забруднення водних ресурсів, розрахованих Держекоінспекцією відповідно до затвердженої Методики, становить близько 140–160 млн грн, про це 27 березня 2024 року повідомив міністр захисту довкілля та природних ресурсів України Руслан Стрілець [9].

На момент подання статті до видання стало відомо про ще один масований комбінований удар по енергетичних об'єктах ЯПЦ України, зокрема, йдеться про обстріл Канівської та Дністровської ГЕС. Обстріл був масований – росіяни запустили по Україні 99 ракет і дронів-камікадзе. Сили

протиповітряної оборони України збили 58 безпілотних літальних апаратів типу Shahed і 26 ракет.

Президент Володимир Зеленський під час засідання Ставки заявив: «Цієї ночі (29.03.24 р. – авт.) свідомими цілями ворога стали Канівська та Дністровська ГЕС. Країна-терорист хоче повторення екологічної катастрофи на Херсонщині, але тепер під загрозою не лише Україна, а й Молдова. Вода не зупиниться перед прикордонними стовпами, як не зупиниться і російська війна, якщо разом і вчасно не зупинити її в Україні», – наголосив Глава держави [10].

Висновки.

1. У попередніх дослідженнях [11] проведено аналіз стану ядерних блоків ЯПЦ, де зазначалось, що Україна має у своєму розпорядженні чотири діючі атомні електростанції (Рівненська, Хмельницька, Запорізька, Південноукраїнська) та одну зупинену (Чорнобильська), що налічують загалом 15 (+ 4) реакторів та забезпечують 53,6 % електроенергії України.

2. У ході аналізу потенційних небезпек на радіаційно-небезпечних об'єктах (РНО) України [12] визначено, що основну загрозу становлять аварії на РНО з викидом радіаційної речовини в атмосферу, літосферу та гідросферу.

3. Через загарбання Чорнобильської та Запорізької АЕС проведення вимірів [12] стандартними методами дослідження, скринінгу та моніторингу не можливе, доступ представників МАГАТЕ обмежений. Саме тому слід застосовувати новітні методи вимірювань із використанням автономних дистанційно-керованих наземних, надводних та повітряних дронів в автоматичному об'єктовому або вибірковому вимірюванні радіаційних параметрів на РНО.

Використання автономних апаратів (дронів) сьогодні бачиться найактуальнішим питанням радіаційної безпеки не тільки атомної енергетики, а й усього ЯПЦ як частини екологічної безпеки України.

4. У випадку загарбання ядерного об'єкта чи обмеженого доступу до нього треба змінити й методи досліджень. Якщо об'єкт захоплено частково чи до нього є

доступ, можна застосовувати експрес-методи реєстрації радіаційного забруднення або метод забору проб і в подальшому – метод лабораторних досліджень.

Проте якщо АЕС або об'єкт, що входять до ядерно-паливного циклу України, захоплений і доступ до нього неможливий, залишаються тільки методи дистанційного вимірювання радіаційної обстановки на ядерних об'єктах і навколо них за допомогою наземних та повітряних автономних апаратів [13].

5. Для подальших досліджень необхідно виявити технічні можливості щодо використання власних копалин [14], що є в

Україні, та заміну з радянських реакторів типу РБМК-1000, ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 з паливними елементами, які поставлялися нам з рф, на більш нові типи реакторів європейського та американського виробництва з відповідними елементами завантаження.

6. Після масованих обстрілів та руйнувань об'єктів цивільної, промислової та енергетичної інфраструктури на місце влучань виїжджають судові експерти для проведення експертиз відповідно до нової методики оцінювання руйнувань, для з'ясування можливості відшкодування заподіяних збитків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Російські війська вдарили по Криворізькій ТЕС – Лукашук. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-rosiyskyy-obstril-kryvorizkoyi-tes-lukashuk/31920102.html/> (дата звернення: 30.03.2024).
2. Унаслідок атаки РФ 22 березня були пошкоджені всі енергоблоки Бурштинської та Ладижинської ТЕС. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/burshtynska-ta-ladizhynska-tes-unaslidok-udaru-rf-22-bereznia-buli-poshkodzheni-vsi-energobloki-50405109.html/> (дата звернення: 30.03.2024).
3. «Знищено всі блоки»: дуже погані новини по найбільшій в Україні ТЕС. URL: <https://kyiv.ukrainianwall.com/uk/124681-znishcheno-vsi-bloki-duzhe-pogani-novini-po-naybilshiy-v-ukrajini-tes/> (дата звернення: 30.03.2024).
4. Бурштинська ТЕС. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D1%80%D1%88%D1%82%D0%B8%D0%BD%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D0%A2%D0%95%D0%A1/ (дата звернення: 30.03.2024).
5. ДТЕК Луганська ТЕС перебуває під постійними обстрілами. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-luganska-tes-perebuvaе-pid-postiynimi-obstrilam/> (дата звернення: 30.03.2024).
6. Вуглегірська ТЕС. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вуглегірська_ТЕС (дата звернення: 30.03.2024).
7. Святослав Наумичев, працівник Запорізької АЕС: «Це війна не за територію, а за те, яким світ буде далі»: веб-сайт. URL: <https://energoatom.com.ua/> (дата звернення: 30.03.2024).
8. Наслідки від підриву росією греблі Каховської ГЕС: веб-сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/> (дата звернення: 30.03.2024).
9. Внаслідок атаки РФ по ДніпроГЕС докільню завдано збитків на понад 140 млн гривень – Р. Стрілець. URL: <https://suspilne.media/715240-vnaslidok-ataki-rf-po-dniproges-dovkillu-zavdano-zbitkiv-na-ponad-140-mln-griven-strilec> (дата звернення: 30.03.2024).
10. Зеленський – після Ставки: Цієї ночі цілями ворога були Канівська та Дністровська ГЕС. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3846245-zelenskij-pisla-stavki-ciei-noci-cilami-voroga-buli-kanivska-ta-dnistrovska-ges.html/> (дата звернення: 30.03.2024).
11. Пилипенко О. В., Клименко Г. О., Дракіна К. М. *Основи використання радіонуклідів : зб. тез доп. IX міжнар. наук.-практ. конф. «Безпека життєдіяльності в XXI столітті»*. Дніпро, 17–18 листопада 2022. С. 51–54.
12. Пилипенко О. В., Саньков П. М., Дзюбан О. В., Папірник Р. Б., Ткач Н. О. *Особливості організації радіаційного контролю на об'єктах ядерно-паливного комплексу України*. Токуо, Japan : Otsuki Press, 2022. С. 196–206.
13. Пилипенко О. В., Маринченко О. І. *Засоби та методи виявлення радіації при аваріях на атомних станціях. Проблеми гарантування безпеки людини в умовах сучасних викликів : матер. Всеукр. наук.-практ. конф.* Луцьк, 23–24 березня 2023. С. 27–30.
14. Диверсифікація палива для реакторів ВВЕР. URL: <https://ukrns.org/publications/dyversyfikacziya-palyva-dlya-reaktoriv-vver/> (дата звернення: 30.03.2024).

REFERENCES

1. *Rosiiski viiska vdaryly po Kryvorizkii TES – Lukashuk* [Russian troops strike at Kryvyi Rih thermal power plant]. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-rosiyskyy-obstril-kryvorizkoyi-tes-lukashuk/31920102.html/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).
2. *Unaslidok ataky RF 22 bereznia buly poshkodzheni vsi enerhobloky Burshtynskoi ta Ladyzhynskoi TES* [All power units at Burshtyn and Ladyzhyn TPPs were damaged as a result of the Russian attack on 22 March]. URL:

<https://nv.ua/ukr/ukraine/events/burshtynska-ta-ladzhinska-tes-unaslidok-udaru-rf-22-bereznia-buli-poshkodzheni-vsi-energobloki-50405109.html/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

3. “Znyshcheno vsi bloky” : *duzhe pohani novyny po naibilshii v Ukraini TES* [“All units destroyed” : very bad news about Ukraine's largest thermal power plant]. URL: <https://kyiv.ukrainianwall.com/uk/124681-znishcheno-vsi-bloki-duzhe-pogani-novini-po-naybilshiy-v-ukrajini-tes/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

4. *Burshtynska TES* [Burshtyn TPP]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D1%80%D1%88%D1%82%D0%B8%D0%BD%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D0%A2%D0%95%D0%A1/ (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

5. *DTEK Luhanska TES perebuvaie pid postiynymy obstrilamy* [DTEK Luhanska TPP is under constant shelling]. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-luganska-tes-perebuvae-pid-postiynimi-obstrilam/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

6. *Vuhlehirska TES* [Vuhlehirska TPP]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вуглегірська_ТЕС/ (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

7. *Svyatoslav Naumychev, pratsivnyk Zaporizkoi AES: “Tse viina ne za terytoriiu, a za te, yakym svit bude nadali”* [Svyatoslav Naumychev, employee of Zaporizhzhya NPP: “This is not a war for territory, but for what the world will be like in the future”]. URL: <https://energoatom.com.ua/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

8. *Naslidky vid pidryvu rosiieiu hrebli Kakhovskoi HES* [Consequences of Russia's blowing up of the Kakhovka hydroelectric dam]. URL: <https://mepr.gov.ua/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

9. *Vnaslidok ataky RF po DniproHES dovkilliu zavdano zbytkiv na ponad 140 mln hryven – R. Strilets* [Russian attack on Dnipro hydroelectric power station caused more than UAH 140 million in environmental damage – R. Strelets]. URL: <https://suspilne.media/715240-vnaslidok-ataki-rf-po-dniproges-dovkilliu-zavdano-zbitkiv-na-ponad-140-mln-griven-strilec> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

10. *Zelenskyi – pislia Stavky: Tsiiei nochii tsiliamy voroha buli Kanivska ta Dnistrovska HES* [Zelenskyy – after the Stavka: Last night, the enemy targeted Kaniv and Dniester HPPs]. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3846245-zelenskij-pisla-stavki-ciei-noci-cilami-voroga-buli-kanivska-ta-dnistrovska-ges.html/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

11. Pylypenko O.V., Klymenko H.O. and Drakina K.M. *Osnovy vykorystannia radionuklidiv* [Fundamentals of radionuclides use]. *Bezpeka zhyttiediialnosti v XXI stolitti* [Life Safety in the 21st Century : Intern. sc.-pract. conf.]. Dnipro, 17–18 Nov. 2022, pp. 51–54. (in Ukrainian).

12. Pylypenko O.V., Sankov P.M., Dziuban O.V., Papirnyk R.B. and Tkach N.O. *Osoblyvosti orhanizatsii radiatsiinoho kontroliu na ob'ektakh yaderno-palyvnoho kompleksu Ukrainy* [Peculiarities of radiation monitoring at nuclear fuel facilities of Ukraine]. Tokyo, Japan : Otsuki Press, 2022, pp. 196–206 p. (in Ukrainian).

13. Pylypenko O.V. and Marynchenko O.I. *Zasoby ta metody vyavleniia radiatsii pry avariakh na atomnykh stantsiakh. Problemy harantuvannia bezpeky liudyny v umovakh suchasnykh vyklykiv* [Means and methods of radiation detection in case of accidents at nuclear power plants. Problems of ensuring human safety in the context of modern challenges : Intern. sc.-pract. conf.]. Lutsk, 23–24 March 2023, pp. 27–30. (in Ukrainian).

14. *Dyversyfikatsiia palyva dlia reaktoriv VVER* [Fuel diversification for VVER reactors]. URL: <https://ukrns.org/publications/dyversyfikacziya-palyva-dlya-reaktoriv-vver/> (date of application: 03.30.2024). (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.04.2024.

УДК 699.81:614.84:536:31

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.58.1059

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕСТРУКЦІЇ ТА ГОРІННЯ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ

БЄЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ТОДОРОВ О. П.², *асп.*,
ЧУМАК Л. О.³, *канд. техн. наук, доц.*
ХАРЧЕНКО В. В.^{4*}

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Кафедра фундаментальних та природничих дисциплін, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

^{4*} Відділ Дніпропетровського НДЕКУ МВС України, вул. Січеславська Набережна, 17, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 225-93-89, e-mail: dniprondise@ukr.net

Анотація. *Постановка проблеми.* Пожежі швидко виникає і розвивається за наявності в осередку горючих матеріалів та конструкцій. Це ускладнює, а в деяких випадках робить неможливими ефективно вогнегасіння, евакуацію, порятунок людей і матеріальних цінностей. З метою оцінювання процесів розвитку горіння та розроблення засобів підвищення вогнестійкості виробів та конструкцій необхідно вивчити процеси горіння матеріалів. *Мета* – моделювання процесів горіння легкодиспергуючих речовин і розвитку газоподібних реакцій та їх суміщення на прикладі горіння деревини. *Методика* – вивчення процесів горіння, математичне моделювання процесів горіння на прикладі горіння деревини з урахуванням деструктивних процесів за дії високих температур з урахуванням правил термодинаміки. *Результати.* Аналіз показав, що виділення основних стадій під час моделювання горіння деревини значно менше розроблене, ніж у випадку горіння газових систем. Особливо складно це зробити для опису горіння деревини, на поверхні якої відбувається взаємодія мас (і тепла) при вигоранні окремих компонентів, причому розмір поверхні фронту горіння на одиницю перерізу зразка також може змінюватись у часі. Тому визначенням основної стадії горіння деревини слід користуватись в основному для якісного аналізу процесу, а кількісні моделі горіння деревини слід будувати по можливості з урахуванням усіх визначальних факторів, що характеризують явища. *Наукова новизна.* Вперше на основі моделювання процесів горіння органічних матеріалів визначено закономірності деструктивних процесів, які, залежно від температури, мають спільні закономірності якісних та кількісних характеристик. Визначено хімічну стадійність та її зв'язок із фізичною стадійністю перетворення горючих органічних матеріалів, диспергованих у поверхневому шарі, із сумарним тепловим ефектом хвилі горіння. *Практична значимість.* Виділення стадій під час хвильового горіння деревини дозволяє мати якісне відображення процесів залежно від просторової зони та її віддалення від газової зони, що дозволяє прогнозувати розроблення захисних засобів органічних матеріалів від горіння.

Ключові слова: *пожежа; горіння; стадія горіння; вогнестійкість*

SIMULATION THE PROCESSES OF ORGANIC MATERIALS DESTRUCTION AND COMBUSTION PROCESSES CONDITION OF FIRE INTENSEICATION

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
TODOROV O.P.², *Postgrad. Stud.*,
CHUMAK L.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KHARCHENKO V.V.⁴

¹ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Department of Fundamental and Natural Sciences, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

^{4*} Department of the Dnipropetrovsk Research Institute of Forensic Expertise, Ministry of Internal Affairs of Ukraine, 17, Sicheslavsk Naberezhna St., Dnipro, 49000, Ukraine, tel.+38 (096) 225-93-89, e-mail: dniprondise@ukr.net

Abstract. Problem statement. The rapid occurrence and development of fires are caused by the occurrence of combustible materials and structures in their focus. This complicates, and in some cases makes impossible, effective firefighting, evacuation, and rescue of people and property. In order to correctly assess fire resistance, effectively increase fire resistance, and change the flammability of materials, it is necessary to study the materials burning process. **The purpose of the article.** To study of the combustion of easily dispersible substances and the development of gaseous reactions and their combination using the example of wood combustion. **Methods.** We use mathematical modeling of combustion and destructive processes under the high temperatures, taking into account the rules of thermodynamics. **Research results.** The conducted analysis showed that the selection of the main stages in the simulation of wood combustion is much less developed than in the case of the combustion of gas systems. It is especially difficult to do this to describe the combustion of wood, on the surface of which there is an interaction of masses (and heat) during the combustion of individual components, and the size of the front surface per unit cross-section of the sample may also change over time. Therefore, the definition of the main stage in wood burning should be used mainly in the qualitative analysis of the process, and quantitative models of wood burning should be built, if possible, taking into account all the determining factors characterizing the phenomena. **Scientific novelty.** For the first time, on the basis of the modeling of organic material combustion is proposed. We determine the patterns of destructive processes, which, depending on the temperature, have common patterns of qualitative and quantitative characteristics. The chemical phasing and its connection with the physical phasing of the transformation of combustible organic materials dispersed in the surface layer with the overall thermal effect of the combustion wave were determined. **Practical value.** The identification of stages during the wave burning of wood allows for a qualitative display of processes depending on the spatial zone and its distance from the gas zone, which allows predicting the development of protective means of organic materials against combustion.

Keywords: *fire; combustion; combustion stage; fire resistance*

Постановка проблеми. Швидко виникнення і розвиток пожежі відбуваються за наявності в осередку виникнення горючих матеріалів та конструкцій. Це ускладнює, а в деяких випадках робить неможливим ефективно вогнегасіння, евакуацію, порятунок людей і матеріальних цінностей. З метою правильної оцінки вогнестійкості, ефективного підвищення вогнестійкості, зміни горючості матеріалів необхідно вивчити процеси горіння матеріалів.

Теоретичні розробки, що існують зараз, у більшості випадків базуються на уявленнях про вузькі зони хімічних перетворень. Неможливість докладного опису всіх хімічних реакцій, що відбуваються у хвилі горіння матеріалу, викликає необхідність моделювання процесів горіння та виділення декількох умовних стадій, що дозволяє докладно оцінити зміни вогнестійкості, які відбуваються у матеріалі, та можливості її підвищення.

Аналіз процесу горіння на прикладі горіння деревини

За температури, яка дещо перевищує 1 000 °С, у деревині відбувається гідроліз полісахаридів. Крім того, розкладання відбувається з поглинанням тепла, а від температури вище 1 500 °С процес розкладання прискорюється. За температур від 175–285 до 3 500 °С виділяється велика кількість CO₂, CO і рідкий дистилят, що містить оцтову кислоту, її гомологи і метанол. За температури понад 2 800 °С утворюються водень та вуглеводні, за 350–5 000 °С розкладання лігніну та екстрактивних речовин супроводжується утворенням невеликої кількості рідких продуктів, таких як важка смола, CO₂, CO і вуглеводні. Максимальна концентрація вуглеводнів досягається за 380–5 000 °С.

Схема процесу горіння матеріалів на прикладі деревини за дії сумарного променево-конвективного теплового потоку – $q_{\text{л}} + q_{\text{к}}$ показана на рисунку 1, де:

T_w , – температура на поверхні, що

перебуває під дією вогню;

T_0 – початкова температура;

T^* – температура у зоні розкладання;

G_w и G_g – розхід через поверхню, що перебуває під дією вогню, твердих часток та газів, що виділяються.

Стадіям, які виділені вище, приписується сумарний тепловий ефект, а швидкість генерації тепла, пов'язана із швидкістю хімічної реакції, описується дещо формальною кінетикою. Під час горіння деревини можуть реалізовуватись

процеси, для яких теоретичний аналіз стадійності у достатньому обсязі досі не проводився. У той же час, з практичного погляду оцінювання вогнестійкості конструкцій, необхідно виділяти основні стадії горіння, оскільки це дає ключ до розуміння усього процесу горіння і керування ним.

Мета дослідження – вивчення горіння легкодиспергуючих речовин і процесу розвитку газоподібних реакцій та їх суміщення на прикладі горіння деревини.

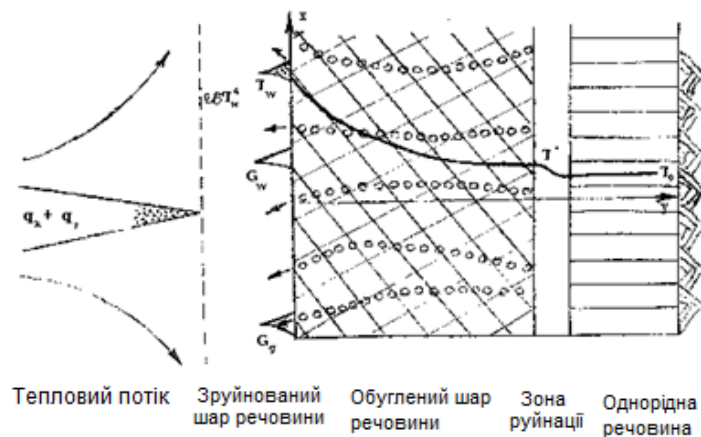


Рис. 1. Схема процесу горіння матеріалів, вироблених із деревини

Обґрунтування методики дослідження

Характерна особливість рівнянь, за допомогою яких описують процеси горіння, полягає в наявності членів, що експоненціально залежать від температури, що властиво закону Арреніуса [3].

Розглянемо деякі якісні оцінки здійснення реакції горіння [1; 2]. Енергія активації реакції горіння має бути набагато більшою за енергію теплового руху молекул за характерної температури процесу, а значення екзотермічного теплового ефекту має значно перевищувати деяку масштабну кількість теплоти:

$$\beta = R \cdot T^* / E \ll 1, \quad \gamma = \beta_c \cdot T^* / Q \ll 1, \quad (1)$$

де T^* – характерна температура процесу; R – універсальна газова постійна; E , Q – енергія активації і тепловий ефект реакції; c – питна теплоємність.

Відомо [4], що за згорання 1 кг

абсолютно сухої деревини і матеріалів на її основі виділяються порівняно близькі кількості теплоти, кДж:

деревина (сосна) – 18 465–20 887;

ДВП напівтверда – 18 560;

тирса (соснова) – 19 420;

фанера (березова) – 20 283.

Практично однакові температури займання цих матеріалів: займання 238–255 °С; самозаймання тлінням 258–305 °С і самозаймання полум'ямим горінням (самозаймання) 360–427 °С.

Для визначення умов існування стаціонарної хвилі горіння сформуємо наступну задачу.

Рівняння теплопровідності у безкінечному просторі однорідного середовища для одновимірного розповсюдження стаціонарної хвилі горіння має вигляд:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda(x, T) \frac{dT}{dx} \right) - m(x, T) c \frac{dT}{dx} + q_v(T) = 0, \\ -\infty < x < +\infty, \quad (2)$$

де $\lambda(x, T)$ – теплопровідність деревини, яка змінюється при проходженні фронту горіння за рахунок утворення обвугленого шару, що має більш низькі значення теплопровідності порівняно із звичайною деревиною; x – координата; $m(x, T)$ – масова швидкість горіння, що змінюється під час горіння за рахунок утворення обвугленого шару і зменшення доступу кисню до поверхні розділу; $q_v(T)$ – функція екзотермічного джерела теплоти, яка визначається нижче за формулою (7). Рівняння (2) записане у відносній системі координат, пов'язаній із фронтом полум'я. Природні граничні умови полягають у тому, що:

$$\text{при } x \rightarrow -\infty, T \rightarrow T_0, \quad (3)$$

$$\text{при } x \rightarrow +\infty, T \rightarrow T_m = T_0 + Q/c, \quad (4)$$

тобто при $x \rightarrow -\infty$ реакція ще не почалась, а при $x \rightarrow +\infty$ – завершилась. Із рівняння (2) при цьому впливає, що функція джерела повинна відповідати умовам:

$$\begin{cases} q_v(T_0) = 0 \\ q_v(T_m) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Аналіз показує [3], що для забезпечення єдиного вирішення задачі на функцію джерела треба накласти ще одне обмеження:

$$\frac{dq_v(T_0)}{dx} \leq 0. \quad (6)$$

На практиці це здійснюють, прирівнюючи до нуля функцію $q_v(T)$ у деяких інтервалах температур, близьких до T_0 [4]:

$$\begin{cases} q_v(T) = 0 \text{ за } T_0 \leq T \leq T_1 \\ q_v(T) = \rho Q f(\eta) k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \text{ за } T_1 < T < T_m \end{cases} \quad (7)$$

де $f(\eta)$ – функція, що враховує залежність швидкості реакції від концентрації у деревині компонентів, які вигорають; η – глибина реакції; k_0 – передекспонента в законі Арреніуса для швидкості реакції.

Результати чисельних розрахунків залежності величини масової швидкості

горіння m від T_1 ($T_1 \in (T_0, T_m)$) показали [5], що якщо виконується нерівність між параметрами γ і β (1):

$$\gamma - \beta = x = \frac{cRT_0T_m}{QE} < 0,1, \quad (8)$$

то швидкість хвилі горіння не залежать від значення T_1 і при $\chi > 0,1$ стаціонарна хвиля горіння існувати не може.

Параметр χ характеризує відношення швидкостей реакції за температур T_m і T_0 :

$$\frac{q_v(T_m)}{q_v(T_0)} = \exp\left(\frac{1}{x}\right).$$

Із нерівності (8) випливає, що для здійснення стаціонарної хвилі горіння енергія активації джерела повинна бути значно більша за енергію теплового руху молекул за початкової температури ($E \gg RT_0$) і тепловий ефект реакції повинен бути не менший за теплову частину ентальпії вихідної системи за початкової температури ($Q > cT_0$).

Як уже вказано, швидкість розповсюдження хвилі горіння тісно пов'язана з хімічною кінетикою. Таким чином, індивідуальні хімічні властивості конкретного палива враховуються завдяки постановці відповідної залежності швидкостей тепловиділення у хімічних брутто-реакціях від концентрації і температури.

Виділення та математичний опис стадій хімічних перетворень зручно пов'язати із фізичною послідовністю перетворень у хвилі горіння. Так, одним із природних шляхів виділення стадій є їх розділення за ознакою фазового стану речовини.

При цьому вважаємо, що всі реакції в конденсованій фазі (κ -фазі) відбувається в одну хімічну стадію, а наступні реакції в газовій фазі – у дві стадії. За одновимірного опису хвилі горіння ці стадії можуть бути рознесені у просторі або повністю, або частково перекриватися. Наприклад, очікується, що за горіння легкодиспергуючих речовин до-фазні (в аерозольних частинках) і газозфазні реакції будуть просторово поєднані.

Часто вдається виділити основну стадію горіння, тобто стадію, яка визначає швидкість горіння таким чином, що математичний опис цієї стадії забезпечує знаходження цієї величини як величини швидкості горіння, так і залежності швидкості горіння, так і від зовнішніх умов без урахування усього різноманіття процесів, що відбуваються поза цією основною стадією. Математичні моделі такого типу прийнято називати елементарними моделями горіння (ЕМГ). Короткий аналіз і класифікація ЕМГ наведені в [5].

Взаємодія стадій горіння. Зміна зовнішніх умов горіння (тиску, температури, масових сил) може спричинити перерозподіл функцій окремих стадій. Провідна стадія може стати другорядною, і навпаки. При цьому може змінитися залежність швидкості горіння від зовнішніх факторів, і поширення хвилі горіння описуватиметься вже іншою ЕМГ, в якій враховано особливості процесів у зоні, що стала головною. При цьому може змінитися залежність швидкості горіння від зовнішніх факторів, і розподіл хвилі горіння буде описуватися вже іншою ЕМГ, у якій враховані особливості процесів у зоні, що стала провідною. Причина зміни провідної стадії – різна чутливість швидкостей реакції у різних стадіях до зміни зовнішніх умов.

Проаналізуємо найпростіші випадки і відмітимо основні закономірності та явища.

Нехай в однорідному (газовому або конденсованому) середовищі розповсюджується хвиля горіння з двома послідовними реакціями $A \rightarrow B \rightarrow C$. Теплові ефекти послідовних реакцій позначимо як $Q_1(A \rightarrow B)$ і $Q_2(B \rightarrow C)$. Для визначеності припустимо, що $Q_2 > 0$. На знак обмеження немає, потрібно лише, щоб сума Q_1 і Q_2 була більша нуля і перевищувала певне граничне значення. Тоді температура горіння $T_m = T_0 + (Q_1 + Q_2)/c$, а температура, що відповідає протіканню тільки першої реакції $T_{10} = T_0 + Q_1/c$. Також вводяться $u_1(T_{10})$ – швидкість (лінійна) розповсюдження хвилі однієї першої реакції із власним тепловим

ефектом; $u_2(T_m)$ – швидкість, що відповідає випадку, коли друга реакція відбувається дуже швидко, так, що наприкінці першої стадії встановлюється температура горіння (перша реакція дуже швидко).

У результаті аналітичного розгляду та чисельного розв'язання задачі автори цитованих праць установили існування трьох режимів стадійного горіння: управління, відриву та злиття. У всіх випадках відповідні масові швидкості першої та другої стадій повинні бути однакові і рівні масовій швидкості горіння. Природно розглядати поширення хвилі горіння по нерухомій речовині.

Розглянемо випадок $Q_1 > 0$. Якщо при цьому $u_1(T_{10}) > u_2(T_m)$, хвиля першої стадії іде вперед, друга стадія практично не впливає на першу, яку в цьому випадку можна назвати головною. Цей режим названо режимом відриву.

Якщо $u_2(T_m) > u_1(T_{10})$, то хвиля другої високотемпературної стадії наздоганятиме хвилю першої стадії. При цьому в хвилі першої стадії зростатиме температура, а з нею і швидкість горіння і, поки при певній кінцевій відстані між зонами першої та другої реакцій не виконається умова $u_1(T_{10}) = u_2(T_m)$. У разі випадкового збільшення міжзонної відстані перша зона охолоджується (отримуючи менше тепла від другої) і гальмується, наближаючись таким чином до другої зони, і навпаки, отож процес стійкий. Температура наприкінці першої зони T_1 вже не рівна T_{10} і не може бути знайдена термодинамічним шляхом. Цей режим горіння названий режимом керування – друга стадія керує швидкістю першої, при цьому $u = u_2(T_m)$.

Якщо рівність $u_1(T_1) = u_2(T_m)$ не виконується до досягнення, у першій зоні температури T_m , швидкість горіння лімітується першою стадією і $u = u_1(T_m) < u_2(T_m)$. Цей режим названо режимом злиття.

Області, де відбуваються різні режими стадійного горіння (для випадку $Q_1 > 0$), можна об'єднати з урахуванням того, що – завжди $u_2(T_m) > u_2(T_{10})$ і подати у такому вигляді:

$u_1(T_m) > u_2(T_m) > u_1(T_{10})$ – керування;

$u_1(T_m) > u_1(T_{10}) > u_2(T_m)$ – відрив; (9)

$u_2(T_m) > u_1(T_m) > u_1(T_{10})$ – злиття.

У випадку, коли параметри окремих стадій є такими, що виконується одна з наведених нерівностей, швидкість двостадійного горіння близька до тієї, що займає у цій нерівності середнє положення.

Якщо перша реакція ендотермічна ($Q_1 < 0$), то виконується:

$u_1(T_m) > u_2(T_m)$ або $u_2(T_m) > u_1(T_m)$. (10)

У такому випадку реальна швидкість реакції близька до одностадійної швидкості, що має меншу величину, тобто реалізуються режими або керування, або злиття.

Газифікація конденсованої фази деревини відбувається завдяки незворотній ендотермічній (або слабоекзотеричній) хімічній реакції. Багаті на енергію газоподібні продукти розкладення κ -фази реагують далі у газовій фазі з виділенням основної кількості тепла. Частина тепла, що виділилося у газовій фазі, витрачається на газифікацію κ -фази і на розігрів речовини від початкової температури T_0 до температури поверхні T_s . При цьому відстань між зоною тепловиділення в газовій фазі і поверхнею в κ -фазі така, що тепловий потік на поверхні горючого забезпечує масову швидкість газифікації, яка у точності дорівнює швидкості реакції в газовій фазі.

Масова швидкість газифікації у режимі керування спричинює інтенсивне обуглювання (конденсована фаза), що різко змінює параметри вогнестійкості дерев'яних конструкцій. Результатом обуглювання дерев'яної конструкції стає значне зменшення її носійної здатності. А оцінка огорджувальної здатності на носійних дерев'яних конструкціях по параметру прогріву з боку, що не обігривається, практично неможлива. Єдиною оцінкою огорджувальної здатності вогнестійкості конструкції може бути швидкість горіння деревини.

Формула для масової швидкості горіння аналогічна формулі для розповсюдження

хвилі горіння в газоподібному середовищі:

$$m^2 = 2n!(cRT_m/QE)^{n+1}(\lambda\rho/c)\kappa_0 \exp(-E/RT_m), \quad (11)$$

де n – порядок реакції; γ , c , ρ – теплопровідність, теплоємність та щільність газу; E – передекспонента і енергія активації; Q – тепловий ефект газофазної реакції; $T_m = T_0 + Q/c$ – максимальна температура горіння; $T_0 = T_0 + Q_1/c_1$ – еквівалентна початкова температура; T_0 – початкова температура; Q_1 – тепловий ефект газифікації κ -фази.

Залежність швидкості горіння від тиску p і початкової температури T_0 характеризується коефіцієнтами:

$$\nu = d \cdot \ln \frac{m}{d} \ln p = \frac{n}{2},$$

$$\beta = d \cdot \ln \frac{m}{dT_0} = \frac{E}{RT_m^2}.$$

Тристадійна модель горіння (одна хімічна стадія відбувається в κ -фазі і дві – в газовій) легко може бути розповсюджена на довільну кількість послідовних стадій, тому без втрати спільності розглянемо більш простий випадок ходу реакцій у дві стадії: перша стадія в κ -фазі ($x < 0$), друга – в газовій ($x > 0$).

Стаціонарний процес розповсюдження хвилі горіння описується системою рівнянь збереження маси і енергії:

$-\infty < x < 0$ (перша стадія, індекс 1):

$$\frac{\lambda_1 d^2 T}{dx^2} - \frac{c_1 m d T}{dx} = \frac{Q_1 m d a_1}{dx} = -\Phi_1(a_1, T) Q_1; \quad (12)$$

$$x = -\infty, T = T_0, a_1 = 1, T = T_s, a_1 = 0; \quad (13)$$

$0 < x < \infty$ (друга стадія, індекс 2):

$$\frac{\lambda_2 d^2 T}{dx^2} - \frac{c_2 m d T}{dx} = \\ = Q_2 \left(\frac{m d a_2}{dx} - \frac{\rho D d^2 a_2}{dx^2} \right) = -\Phi_2(a_2, T) Q_2, \quad (14)$$

де T_0 – початкова температура; $T_{s1} = T_0 + Q_1/c_1$ – температура поверхні κ -фази, що відповідає перебігу тільки першої реакції; Q – тепловий ефект реакції у відповідній фазі; c , λ – теплоємність і

теплопровідність; a – концентрація; ρ – щільність; D – коефіцієнт дифузії газової фази.

Для κ -фази прийнято $\rho = \text{const}$, $D_1 = 0$. Для газофазової реакції $Q_2 > 0$. Обмеження на знак теплового ефекту в κ -фазі немає. Також припускається, що швидкість реакції в κ -фазі Φ_1 від тиску не залежить. Температура поверхні T_s в граничній умові при $x = 0$ має бути визначена. Гранична умова для теплового потоку при $x = 0$ записана на основі попередніх викладок.

Інтегруючи рівняння для a_1 і a_2 від $x = -\infty$ до $x = \infty$, отримуємо співвідношення:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(a_1, T) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_2(a_2, T) dx = m.$$

Інтегруючи далі перше з рівнянь (12), отримуємо:

$$\lambda_2 \left(\frac{dT}{dx} \right) x = 0 = q_1 = \\ = Q_2 \int_0^{\infty} \Phi_2(a_2, T) dx - c_2 m (T_2 - T_s). \quad (15)$$

З урахуванням попереднього співвідношення і виразу для T_{s1}

$$q = m(c_2 T_s - c_1 T_{s1}) \cong mc(T_s - T_{s1}) \text{ при } c_1 \cong c_2 = c.$$

Гранична умова для da_2/dx записана в наближеній подібності полів температури і концентрацій.

Наближені вирази для швидкостей хімічних реакцій в κ - і газовій фазах мають такий вигляд:

$$m_1^2 = \frac{2\rho_1 \chi_1}{2T_s - T_{s1} - T_0} \cdot \frac{RT_0^2}{E_1} k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right); \quad (16)$$

$$m_2^2 = \frac{2n! z \lambda_2}{c} \cdot \frac{(RT_2^2 / E_2)^{n+1}}{(T_2 - T_{s1}) \cdot (T_2 - T_s)^n} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right), \quad (17)$$

де $z = k_{02} \mu (\rho / RT_2)^n$, μ – молярна маса; p – тиск; R – універсальна газова постійна; n – порядок реакції; E , k_0 – енергія активації і передекспонента в законі Арреніуса для швидкості реакції.

У виразах для m_1 і m_2 невідомою величиною є T_s , але, оскільки за стаціонарного горіння $m_1 = m_2 = m$,

співвідношення (16) і (17) можна розглядати як систему для двох невідомих – t і T_s . Так, наприклад, за горіння в режимі відриву швидкість горіння визначається реакціями в κ -фазі (головуючій зоні або стадії) і розраховується за (16) при $T_s = T_{s1}$ ($Q_1 > 0$).

Обговорення результатів. Аналіз чисельного розв'язання задачі про стадійне розповсюдження полум'я по однорідному середовищу показав, що зміна режимів горіння відбувається у достатньо вузькому проміжку зміни параметрів. На цьому ґрунтується висновок, що для таких умов завжди вдається встановити провідну стадію. Процедура виділення провідної стадії описана вище: істинна швидкість горіння близька до значень швидкості, що обчислюється за співвідношеннями для окремої стадії і що займає проміжну позицію між мінімальним та максимальним значеннями.

За переходу до моделювання процесів горіння конденсованих систем питання виділення стадії стає складнішим та менш однозначним, ніж у випадку горіння газів. Тут виникають специфічні труднощі, пов'язані з коректним описом процесів хімічних перетворень, що одночасно відбуваються у хвилі горіння, і зміни фізичного стану речовини: тверде тіло — газонасичений поверхневий шар — газова фаза.

Згідно з уявленнями, під час горіння деревини хімічні реакції починаються в κ -фазі і продовжуються в диспергованих частинках деревини. Крім того, хімічні реакції відбуваються у бульбашках газу всередині поверхневого шару в κ -фазі і після виникнення полум'я. При варіюванні зовнішніх умов горіння відносна роль реакцій у тих чи інших просторових зонах може змінюватися. Наприклад, можливо уявити ситуацію, коли з підвищенням тиску збільшується повнота перетворень у межах κ -фази для окремих реакцій газоподібних продуктів розкладання деревини, і тоді тепловиділення від цих реакцій необхідно буде приписувати не прилеглій газовій зоні, а газонасиченого поверхневого шару деревини.

Враховуючи невисокий коефіцієнт теплопровідності деревини і невелику глибину прогрітого термічного шару відносно товщини конструкції, що прогривається, процеси горіння деревини слід розглядати як горіння термічно товстих тіл.

В існуючих аналітичних моделях горіння хімічна стадійність зазвичай однозначно пов'язується з фізичною стадійністю перетворення речовини у хвилі горіння. Уявляється, що найбільш обґрунтовано можна говорити про брутто-реакції в поверхневих шарах або безпосередньо на поверхні деревини, а також про реакції в газовій зоні. Надійних експериментальних доказів існування за підвищених тисків розвиненої пінної зони на поверхні деревини або інтенсивного диспергування поверхневих шарів до-фази в літературі немає.

Необхідно також звернути увагу на те, що концентрація частинок у потоці продуктів згорання навіть за високих ступенів диспергування порівняно мала. Це зумовлено значним збільшенням обсягу продуктів горіння при переході речовини з конденсованого стану в газ: щільність середовища змінюється в десятки та сотні разів. Отже, для одновимірного опису горіння в димогазовій зоні потрібно ретельно виконувати процедури опосередкування параметрів двофазного середовища та функції тепловиділення.

У спрощеному варіанті, якщо не враховувати реакцій в димогазовій зоні за участі диспергованих частинок k -фази, для моделювання горіння деревини можна розглянути такі два випадки. Нехай у k -фазі відбуваються реакції із сумарним нульовим тепловим ефектом чи ендотермічні. Вочевидь, при цьому не може існувати режим із провідною стадією в k -фазі, можливі лише режими управління з боку газової фази, коли процес ведуть газофазні реакції за температури полум'я T_2 , і злиття, коли реакції в k -фазі відбуваються за температури, близької до T_2 . Тут для простоти передбачається, що реакції в газі тривають в одну стадію, хоча, як видно з

вищевикладеного, цей підхід легко узагальнюється на довільну кількість компонентів.

У другому випадку у k -фазі відбуваються хімічні перетворення. Тоді до вказаних вище режимів додається режим відриву, коли реакції у газі мають лімітований у часі індукційний період. Однак маємо вказати, що в обох випадках режим злиття малоімовірний.

Слід також зазначити, що існуючі теоретичні побудови у більшості випадків базуються на уявленні про вузькі зони хімічних перетворень, в той час як під час горіння деревини можуть реалізовуватись і широкі зони, для яких теоретичний аналіз стадійності в повному обсязі не проводився. У той же час із практичної точки зору важливо навчитись і, в даному випадку, виділяти основні стадії горіння, оскільки це дає ключ до керування усім процесом.

Висновки.

1. Проведений аналіз показав, що питанням виділення основних стадій під час горіння деревини не приділялось достатньо уваги. При цьому не завжди послідовно проводився кількісний аналіз закономірностей горіння, досліджувались лише якісні характеристики процесу: залежність швидкості горіння від p , T_0 . Як результат, виникають ситуації, коли для деревини різні автори трактують механізм горіння з діаметрально протилежних позицій.

2. Резюмуючи, можна вказати, що в теоретичному плані виділення основних стадій в моделюванні горіння деревини значно менше розроблене, аніж у випадку горіння газових систем. Особливо складно це зробити для опису горіння деревини, на поверхні якої відбувається взаємодія мас (і тепла) під час вигорання окремих компонентів, причому розмір поверхні фронту на одиницю перерізу зразка також може змінюватись у часі. Тому визначенням основної стадії в процесі горіння деревини слід користуватись в основному для якісного аналізу процесу, а кількісні моделі горіння деревини слід будувати по можливості з урахуванням усіх

визначальних факторів, що характеризують явища.

3. На основі аналітичних досліджень можна зробити висновок, що критерії, які характеризують вогнестійкість дерев'яних конструкцій, повинні бути переглянуті і доповнені. Основний критерій для усіх носійних конструкцій – це втрата носійної здатності. Для дерев'яних конструкцій втрату носійної здатності визначають по швидкості горіння.

4. Враховуючи, що в процесі горіння постійно існує конденсована фаза, з певною товщиною обугленого шару, для визначення вогнестійкості необхідно визначити швидкість фронту горіння вглиб деревини з урахуванням повного згорання та обуглення деревини. В обугленій деревині відбувається багато процесів – від прогріву-газифікації до її деструкції, в результаті чого цей обуглений шар втрачає здатність нести будь-які навантаження.

5. Для таких носійних конструкцій як колони, балки, стропила, арки та ін. прогорання, в окремо взятій точці, углиб конструкції спричинює зменшення перерізу до критичного значення. Критично малий

переріз не в змозі витримувати нормативні навантаження і за досягнення межі міцності конструкція руйнується.

Оскільки обчислення швидкості горіння викликає певні труднощі, коли потрібно враховувати велику кількість факторів та умов, з практичної точки зору доцільно прийняти як показник ступеня вогнестійкості зміну перерізу «свіжої» деревини, тобто такої деревини, що міститься за k -фазою.

Другий показник оцінки вогнестійкості огорожувальних конструкцій – це їх прогрівання до температури 140°C і більше на стороні, що не обігривається. Для дерев'яних огорожувальних конструкцій з урахуванням конденсованої фази (обугленого шару), у якій змінені теплопровідні властивості, оцінка по прогріву на необігритій стороні і за втратою маси зразків після випробувань може спричинити значні помилки.

Тому вогнестійкість слід оцінювати за визначенням сумарної втрати мас зразків з урахуванням маси, що згоріла або обуглилась.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 94. Pp. 706–714.
2. Burgoyne J. A., Neale R. F. Some new Measurements Inflammability Ratios in Air. *Fuel*. 1953. Vol. 32. Pp. 18–26.
3. Besson et Facler. Nouveaux essais d'incendies dans des immeubles recis. Livraison № 36 du G.S.T.B. cahier. № 292. Pp. 120–128.
4. Building Materials Directory. Underwrites Laboratories. January, 1980. 537 p.
5. Forney G. P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. National Institute of Standards. P. 234.
6. Трошкин С. Э., Сидней С. А., Тищенко Е. А., Некора О. В. Исследование адекватности результатов математического моделирования динамики пожара в помещении с помощью программного комплекса FDS. *Пожарная безопасность : теория и практика*. 2015. № 20. С. 104–109.
7. Ковалишин В. В. Перевірка на адекватність моделювання процесів розвитку і гасіння пожеж в кабельних тунелях (в обмежених об'ємах). *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*. 2013. № 1 (27). С. 38–44.
8. Трошкин С. Е., Поздеев С. В., Некора О. В., Беліков А. С. Визначення адекватності математичних моделей тепломасообміну під час виникнення пожеж у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2 (16). С. 153–161. URL: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.153-161>.
9. Нуянзін О. М., Некора О. В., Поздеев С. В. та ін. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій : монографія. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. 120 с.
10. Капцов І. І. та ін. Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень : методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни «Організація наукових досліджень». Харків : ХНАМГ, 2009. 59 с.

REFERENCES

1. Zhang P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 94, pp. 706–714.
2. Burgoyne J.A. and Neale R.F. Some new Measurements Inflammability Ratios in Air. *Fuel*. 1953, vol. 32, pp. 18–26.
3. Besson et Facler. Nouveaux essais d'incendies dans des immeubles réels. Livraison no. 36 du G.S.T.B. cahier. No. 292, pp. 120–128.
4. Building Materials Directory. Underwrites Laboratories. January, 1980, 537 p.
5. Forney G.P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. National Institute of Standards. P. 234.
6. Troshkyn S.E., Sydnei S.A., Tyshchenko E.A. and Nekora O.V. *Yssledovanye adekvatnosti rezultatov matematycheskoho modelyrovanyia dynamyky pozhara v pomeshcheny s pomoshchiu prohrammnoho kompleksa FDS* [Adequacy of the results of mathematical modeling of indoor fire dynamics using the FDS software complex]. *Pozharnaia bezopasnost: teoriya y praktyka* [Fire safety: theory and practice]. 2015, no. 20, pp. 104–109. (in Ukrainian).
7. Kovalyshyn V.V. *Perevirka na adekvatnist modeliuвання protsesiv rozvytku i hasinnia pozhezh v kabelnykh tuneliakh (v obmezhenykh ob'iemakh)* [Checking the adequacy of modeling the development and extinguishing of fires in cable tunnels (in limited volumes)]. *Naukovyi visnyk Ukrainського naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoi bezpeky* [Scientific Bulletin of the Ukrainian Research Institute of Fire Safety]. 2013, no. 1 (27), pp. 38–44. (in Ukrainian).
8. Troshkyn S.E., Pozdneev S.V., Nekora O.V. and Belikov A.S. *Viznachennya adekvatnosti matematichnih modeley teplomasoobmynu pid chas viniknennya pozhezh u vertikalnih kabelnih tunelyah atomnih elektrichnih stantsiy* [Determining the adequacy of mathematical models of heat and mass transfer during fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants]. *Naukovyi visnyk : chyvilniy zachyst I pozhezhna bazpeka* [Scientific Bulletin : Civil Defense and Fire Safety]. 2023, no. 2 (16), pp. 153–161. URL: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.153-161> (in Ukrainian).
9. Nuianzin O.M., Nekora O.V., Pozdieiev S.V. and oth. *Metody matematychnoho modeliuвання teplovykh protsesiv pry vyprobuvanniakh na vohnestiikist zalizobetonnykh budivelnykh konstruktsii: monohrafiia* [Methods of mathematical modeling of thermal processes during fire resistance tests of reinforced concrete building structures: monograph]. Cherkasy : CHIPB im. Heroiv Chornobylia NUTsZ Ukrainy, 2019, 120 p. (in Ukrainian).
10. Kaptsov I.I. and oth. *Statystychni metody. Analiz ta oformlennia naukovykh doslidzhen : metodychni vkazivky do naukovo-doslidnytskoi praktyky z dystsypliny "Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen"* [Statistical methods. Analysis and design of scientific research : methodological guidelines for scientific research practice in the discipline "Organization of scientific research"]. Kharkiv: KhNAMH Publ., 2009, 59 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.05.2024.

УДК 92.542.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.68.1060

РОЗРОБКА КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ТРАВІЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В СИЛЬНОАГРЕСИВНИХ ГАРЯЧИХ СІРЧАНОКИСЛИХ РОЗЧИНАХ

БЕРЕЗЬЮК А. М.^{1*}, канд. техн. наук, проф.,
ГАННИК М. І.², канд. техн. наук, доц.,
МАРТИШ О. П.³, канд. техн. наук, доц.,
ПАПІРНИК Р. Б.⁴, канд. техн. наук, доц.,
МАРТИШ О. О.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 732-37-76, e-mail: [berezkykanatoliy@gmail.com](mailto:berezykanatoliy@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

² Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 341-64-38, e-mail: gannyk.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3278-9232

³ Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 410-42-20, e-mail: martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

⁴ Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 528-84-46, e-mail: ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

⁵ Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 713-23-77, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

Анотація. Постановка проблеми. Технологічний процес металургійних, трубопрокатних, хімічних і інших підприємств включає хімічну обробку металопродукції травленням у гарячих (60–80 °С) розчинах сірчаної кислоти концентрації 20–22 %. Такий спосіб хімічної обробки металопродукції здійснюється у травільних відділеннях підприємств у спеціальних ємностях (травільних агрегатах). Травільний розчин указаної концентрації й температури – це сильно агресивне середовище для всіх будівельних конструкцій із традиційних матеріалів. Існуючі технологічні травільні агрегати хімічної обробки металопродукції не забезпечують надійності і довговічності роботи і руйнуються через 1–2 роки експлуатації. Тому підприємства чорної металургії, які мають травільні відділення для хімічної обробки металоконструкцій, належать до підприємств із сильно агресивним середовищем і їх проектування повинно здійснюватися з урахуванням цих умов. **Мета роботи** – пошук і впровадження у виробництво механізмів підвищення стійкості полімербетонів в агресивному середовищі. **Об’єкт дослідження** – полімербетон на модифікованих фуранових смолах. **Предмет дослідження** – впровадження у виробництво і вивчення особливостей та удосконалення конструктивних рішень травільних ванн із матеріалів на основі полімербетонів у агресивному середовищі. **Основна частина** – розроблення конструктивного рішення технологічних травільних агрегатів із конструкційного корозійностійкого матеріалу (полімербетону на фуранових смолах). **Висновки.** Травлення металовиробів на підприємствах чорної металургії проводиться у сильноагресивних гарячих розчинах сірчаної кислоти 20–25 % концентрації за температури 60–80 °С. В умовах постійної дії сильноагресивних гарячих сірчанокислих розчинів навіть захист їх хімічно стійкими матеріалами не забезпечує необхідної їх надійності і довговічності. Для виготовлення таких конструкцій необхідний новий конструктивний матеріал, який сполучав би хімічну стійкість із міцністю і довговічністю. Таким матеріалом виявився конструктивно хімічно стійкий полімербетон на основі термореактивних фуранових смол, які володіють високою міцністю, універсальною хімічною стійкістю, що дозволяє принципово по-новому вирішити проблему надійності і довговічності технологічних агрегатів хімічної обробки металоконструкцій підприємств чорної і кольорової металургії. Нове конструктивне рішення технологічних травільних агрегатів з армополімербетону полягає в комплексі з амортизаційними брусками й удосконаленою системою вентиляції, які складаються з окремих елементів повної заводської готовності масою не більше 5 т, що дозволяє їх транспортування і монтаж у діючих цехах травільних відділів існуючими механізмами.

Ключові слова: полімербетон; фуранові смоли; агресивне середовище; травільні агрегати

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE DESIGN OF PICKLING UNITS FOR OPERATION IN HIGHLY AGGRESSIVE HOT SULPHURIC ACID SOLUTIONS

BEREZYUK A.M.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Prof.*,
HANNYK M.I.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MARTYSH O.P.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
PAPIRNYK R.B.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MARTYSH O.O.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 732-37-76, e-mail: berezykanatoliy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

² Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 341-64-38, e-mail: gannyk.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3278-9232

³ Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 410-42-20, e-mail: martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

⁴ Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 528-84-46, e-mail: ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

⁵ Department of Organisation and Management in Construction, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (093) 713-23-77, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

Abstract. Problem statement. Technological process of metallurgical, pipe-rolling, chemical and other enterprises includes chemical treatment of metal products by pickling in hot (60–80 °C) sulphuric acid solutions with a concentration of 20–22 %. This treatment method is conducted in the pickling departments of enterprises in special containers (pickling units). Pickling solution of the specified concentration and temperature is a highly aggressive environment for all building structures made of traditional materials. Existing pickling units for chemical treatment of metal products do not ensure reliability and durability and are destroyed after 1-2 years of operation. Therefore, ferrous metallurgy enterprises that have pickling departments for chemical treatment of metal structures are classified as enterprises with a highly aggressive environment and their design should be developed with these conditions under consideration. **The purpose of the work:** Searching for and implementing mechanisms to improve the resistance of polymer concrete in aggressive environments in production. **The object of research** – is furan resins modified polymer concrete. **The subject of the research** – investigation of the particularities and improvement of constructive design for pickling baths made of materials based on polymer concrete in an aggressive environment and its implementation in production. **Main part.** Development of constructive design for technological pickling units made of structural corrosion-resistant material (furan resins modified polymer concrete). **Conclusions.** Pickling of metal products at ferrous metallurgy enterprises is conducted in highly aggressive hot sulphuric acid solutions of 20–25 % concentration at a temperature of 60–80 °C. Under the conditions of constant exposure to highly aggressive hot sulphuric acid solutions, even protection with chemically resistant materials does not ensure the required reliability and durability. To manufacture such structures, a new structural material is needed that combines chemical resistance with strength and durability. This material is a structurally chemical-resistant polymer concrete based on thermoset furan resins, which have high strength and universal chemical resistance, allowing us to solve the problem of reliability and durability of technological units for chemical treatment of metal structures at ferrous and non-ferrous metallurgy enterprises in a fundamentally new way. New constructive design for pickling units made of reinforced polymer concrete was developed in conjunction with shock-absorbing bars and an improved ventilation system, consisting of individual elements of full factory readiness weighing no more than 5 tonnes, which allows them to be transported and installed in operating pickling workshops using existing mechanisms.

Keywords: *polymer concrete; furan resins; aggressive environment; pickling units*

Постановка проблеми. Технологічний процес трубопрокатних, металургійних, хімічних й інших підприємств включає хімічну обробку металопродукції

травленням у гарячих (60–80 °C) розчинах сірчаної кислоти концентрації 20–22 %. Такий спосіб хімічної обробки металопродукції здійснюється у травильних

відділеннях підприємств у спеціальних емностях (травильних агрегатах).

Існуючі технологічні травильні агрегати хімічної обробки металопродукції не забезпечують надійності і довговічності роботи і руйнуються через один–два роки експлуатації. Проблема вирішується шляхом використання полімербетону.

Аналіз сучасних експериментальних і літературних даних [1; 2] показує значні переваги застосування полімербетонів [3].

У зв'язку з безперервним зростанням потреб у застосуванні стійких до агресивного середовища будівельних матеріалів в Україні, а також перспективним використанням їх у будівництві, металургії, хімічній промисловості, за даною тематикою досліджень розроблено травильні агрегати на основі полімербетонів.

Мета роботи – пошук і впровадження у виробництво механізмів підвищення стійкості полімербетонів в агресивному середовищі.

Об'єкт дослідження – полімербетон на модифікованих фуранових смолах.

Предмет дослідження – впровадження у виробництво і вивчення особливостей та удосконалення конструктивних рішень травильних ванн із матеріалів на основі полімербетонів у агресивному середовищі.

Методика. Проведення досліджень показано на розробленні технологічної лінії з виготовлення повнозбірних великогабаритних травильних агрегатів із корозостійкого армополімербетону на термореактивних фуранових смолах.

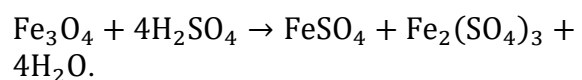
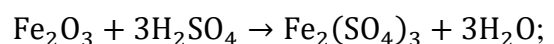
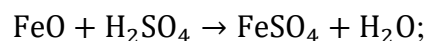
Наукова новизна. Ефективність нових армополімербетонних конструкцій, які підлягають освоєнню, залежить від раціонального вибору матеріалів з урахуванням останніх досягнень науки і техніки.

Практична значущість. Високі показники термічної і динамічної міцності, зносостійкості та корозійної стійкості полімербетонів дозволяють використовувати їх у різних галузях виробництва.

Виклад результатів. Перш ніж висвітлити конструктивні рішення технологічних травильних агрегатів із традиційних матеріалів, необхідно показати технологію хімічної обробки металевих виробів травленням на підприємствах чорної металургії.

У процесі виробництва, збереження, транспортування метали у вигляді листів, стрічок, труб, дроту або різного роду деталей випробовують дію навколишнього середовища, у результаті чого їх поверхня покривається окисними плівками, термічною окалиною, продуктами корозії. Чужорідний зовнішній шар, що виникає погіршує вигляд деталей, перешкоджає нанесенню захисних покриттів і проведенню чергових операцій технологічного процесу.

Для усунення різних окисних сполук (іржі, окалини, продуктів корозії) використовують травлення металу. Іржа являє собою суміш гідратів окису заліза $\text{Fe}(\text{OH})_2$ і $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Процеси, які відбуваються під час травлення, можна пояснити на прикладі взаємодії сірчаної кислоти із залізом, на поверхні якого має місце окалина. Окалина на залізі складається в основному із суміші окислів FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 . Взаємодіючи з кислотою, ці окисли створюють розчинні у воді солі за наступними реакціями:



Оскільки шар окалини не рівномірний по товщині, а на окремих ділянках металу взагалі відсутній, під час травлення поряд з окислами відбувається часткове розчинення металевого заліза.

Розчинність окислів заліза у кислоті різна. У сірчаній вони розчиняються менше, ніж у соляній кислоті тієї концентрації. Поряд із тим, сірчана кислота більш активно реагує із залізом, ніж соляна.

Ці обставини мають істотне значення, тому що реакція взаємодії заліза із сірчаною кислотою супроводжується виділенням

водню. Накопичені у розчині сірчаноокислі солі також сприяють травлячій дії на залізо.

Ці побічні процеси зумовлюють розтравлення металу і виділення атомарного водню, який дифундує з металом. У соляній кислоті видалення окалини відбувається переважно за рахунок її розчинення.

У сірчаній кислоті окалина усувається у результаті порушення її зв'язку з металом, завдяки його підтравленню і розрихленню окалини пухирцями водню. Підкислення у визначених межах концентрації кислоти і температури розчину підсилюють травленням [1].

Найбільша швидкість травлення досягається у 20–25 % сірчаній або в 10–20 % соляній кислоті. Підвищення температури розчину інтенсифікує процес травлення. Так, наприклад, за підвищення температури 10 % розчину сірчаної кислоти від 15 до 60 °С швидкість травлення зростає в 10–15 разів. Тому травильні розчини на основі сірчаної кислоти доцільно нагрівати до 50–60 °С. Сірчаноокислі розчини не нагрівають вище 30–40 °С через велику летючість хлористого водню.

Виділення водню, що відбувається під час травлення у кислоті заліза і його сплавів, впливає на властивості металу. У результаті проникнення в метал атомарного водню підвищується крихкість, зменшується в'язкість і міцність металу.

Кількість пошкоджених при поглинанні сталю водню зростає із тривалістю травлення і підвищенням температури розчину. За однакового режиму травлення сталі у сірчаній кислоті виділяється більша кількість водню і більше його поглинається металом, ніж у разі травлення в соляній кислоті такої ж нормальності [1].

Для зменшення впливу небажаних побічних процесів під час травлення останніми роками все більше застосовують затримувачі, або інгібітори корозії, які вводять у травильні розчини. Ці добавки значно затримують процес розчинення металу, зменшуючи кількість відділяючого водню і тим самим наводорожування металу. Швидкість розчинення окалини при цьому змінюється не значно. Отож, за

використання інгібітора травлення можна запобігти перетравленню металу, погіршенню його механічних властивостей, зниження витрати кислоти.

Як інгібітори використовуються деякі мінеральні солі, наприклад хлористий натрій і ряд органічних сполук. Уведення 3–5 г/л хлористого натрію у розчин, який містить від 40 до 200 г/л сірчаної кислоти, в 10–15 разів знижує втрати металу під час травлення сталі порівняно з розчином, який не містить добавки хлориду [1].

Найчастіше використовують органічні інгібітори. Один із найбільш відомих і давніх – інгібітор 4 М (ізобутилбромід), який вводять у сірчаноокислі розчини. Для таких же розчинів додають інгібітори КС (Roclean L 211) уротропін, БА-6 (EPUROKER). У соляноокислі розчини додають КС (катанін), уротропін. Інгібіторними діями володіють змочувальні речовини ОП-7 (органічні броміди) і ОП-10 (модифіковані броміди).

У виборі травильних розчинів необхідно враховувати економічну складову процесу. У цьому відношенні сірчана кислота має низку переваг порівняно із соляною кислотою. Сірчана кислота дешевша, процес травлення за рівних умов відбувається швидше, питомі витрати кислоти менші. Розчини з більшим умістом сірчаноокислого заліза, що накопичилось у результаті травлення, можуть бути регенеровані і повернені у виробництво.

На основі аналізу матеріалів дослідження прийнято конструктивне рішення технологічних травильних агрегатів із традиційних матеріалів.

Хімічна обробка металоконструкцій (труб, листів, дроту-катанки та інших) гарячим розчином кислот на підприємствах чорної металургії – це одна з основних операцій виробничого процесу, від якої залежить якість продукції, що випускається.

Травлення металовиробів у наш час здійснюється в технологічних травильних агрегатах багатошарової конструкції (рис. 1), що складається із сталюого корпусу – 1, гідроізоляції внутрішніх поверхонь корпусу поліізобутиленом у два

шари на клею № 84 – 2, футеровки сталюого корпусу кислотостійкою цеглою на діабазовій замазці – 3, дерев'яних амортизаційних брусів – 4, бортових

відкосів із цегли – 5, дерев'яного настилу між травильними агрегатами – 6, вентиляційних каналів-колекторів – 7.

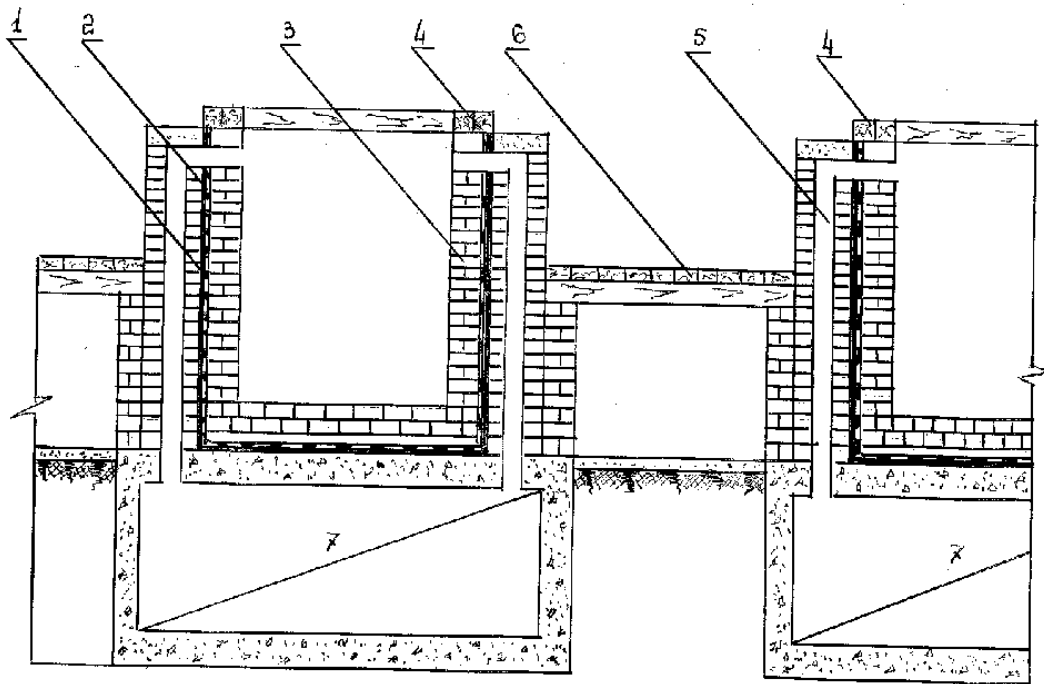


Рис. 1. Конструктивне рішення технологічних травильних агрегатів із традиційних матеріалів: 1 – сталюий корпус; 2 – гідроізоляція корпусу поліізобутиленом; 3 – футеровка сталюого корпусу кислотостійкою цеглою; 4 – дерев'яні амортизаційні бруски; 5 – бортові відкоси із кислотостійкою цегли; 6 – дерев'яний настил між травильними агрегатами; 7 – вентиляційні канали-колектори

Проте весь цей комплекс хімічного і конструктивного захисту сталюого корпусу травильного агрегата не забезпечує його надійності і довговічності, тому що у процесі експлуатації гарячий кислотний розчин проникає через шви цегляної кладки до сталюого корпусу і руйнує його. Процесу руйнування футеровки із кислотостійкою цегли сприяють також динамічні удари пакетів трую або інших металовиробів. У результаті цього травильні агрегати із традиційних матеріалів руйнуються протягом одного-двох років експлуатації або потребують капітального ремонту, витрати на який досягають 5–60 % вартості нового травильного агрегата.

Конструкції з деревини (амортизаційні бруски, частини між травильними агрегатами) в умовах агресивного середовища і динамічних ударів пакетів труб швидко руйнуються, а створений при цьому шлам забруднює канали, труби і

фільтри, що спричинює їх закупорку і порушення технологічного процесу.

Через такі недоліки традиційних металофутерувальних конструкцій травильних агрегатів стало необхідним переглянути технічні рішення травильних агрегатів з метою зниження металоємності і вартості, а також підвищення надійності і довговічності їх роботи за дії сильноагресивних гарячих сірчаноокислих розчинів.

У результаті запропоновано рішення технологічних травильних агрегатів із нового конструктивного корозійностійкого матеріалу (армополімербетону на фуранових смолах).

Недоліки існуючих травильних агрегатів із традиційних матеріалів зумовили необхідність розроблення нового конструктивного рішення травильних агрегатів з армополімербетону на фуранових смолах із поліпшеною системою вентиляції,

які раніше виконувались із моноліту, а потім стали збірно-монолітними.

Враховуючи, що для виготовлення великогабаритних травильних агрегатів з армополімербетону у монолітному і збірно-монолітному виконанні на кожному заводі, на місці установки, необхідно влаштовувати бетонозмішувальний вузол, заготовлювати і зберігати компоненти полімербетонної суміші, виготовляти опалубку і

армокаркаси, створювати і навчати бригаду бетонувальників, вести контроль якості матеріалів і технологічних процесів, прийнято рішення розробляти нову повнозбірну конструкцію травильного агрегата у комплексі з удосконаленою системою вентиляції та амортизаційними брусами з окремих елементів масою не більше 5 т (рис. 2).

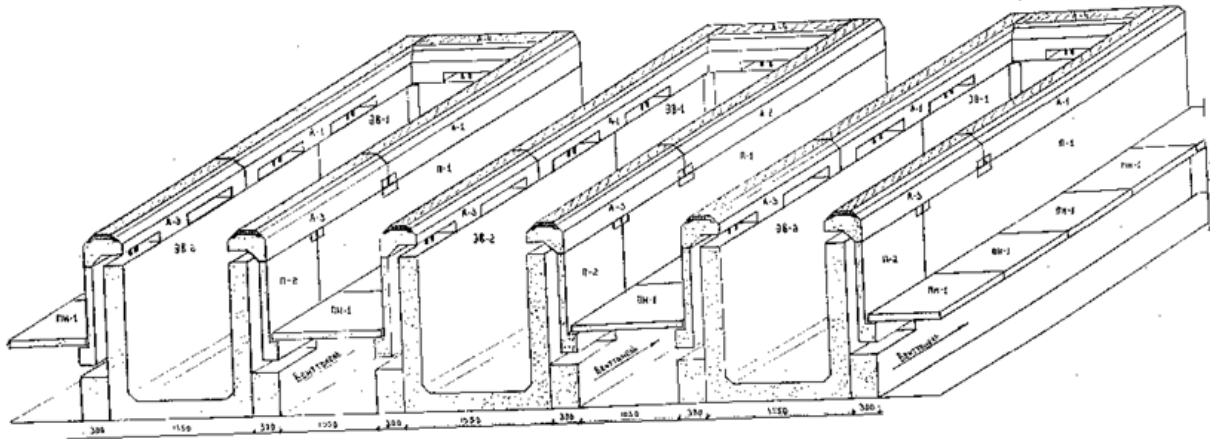


Рис. 2. Загальний вигляд повнозбірної конструкції травильного агрегата з армополімербетону

Виготовлення таких травильних агрегатів передбачається у спеціалізованих цехах індустріальним способом. Окремі елементи травильного агрегата повної заводської готовності, масою не більше 5 т, будуть транспортуватися до місця установки автомобільним чи залізничним транспортом. Далі їх монтувала спеціальна виїзна бригада з подальшим опоряджуванням окремих стиків з'єднання безусадковим полімербетонним герметиком.

Висновки.

Травлення металовиробів на підприємствах чорної металургії відбувається в сильноагресивних гарячих розчинах сірчаної кислоти 20–25 % концентрації за температури 60–80 °С. В умовах постійної дії сильноагресивних гарячих сірчаноокислих розчинів, в яких працюють технологічні травильні агрегати, навіть захист хімічно стійкими матеріалами не забезпечує їх необхідної надійності і довговічності. Очевидно, що для

виготовлення таких конструкцій необхідний новий матеріал, який поєднував би хімічну стійкість із міцністю і довговічністю.

Таким матеріалом виявився конструктивно хімічно стійкий полімербетон на основі термореактивних фуранових смол, які володіють високою міцністю, універсальною хімічною стійкістю, що дозволяє принципово повному вирішити проблему надійності і довговічності технологічних агрегатів хімічної обробки металоконструкцій підприємств чорної і кольорової металургії.

Нове конструктивне рішення технологічних травильних агрегатів з армополімербетону виконане в комплексі з амортизаційними брусами й удосконаленою системою вентиляції, яке складається з окремих елементів повної заводської готовності масою не більше 5 т, що дозволяє їх транспортування і монтаж у діючих цехах травильних відділів існуючими механізмами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур : навч. посіб. Черкаси, 2011. 170 с.
2. Березюк А. М., Папірник Р. Б., Ганник М. І., Мартиш О. П., Огданський І. Ф., Гайдар А. М. Внутрішні напруги в фуранових композитах і шляхи їх релаксації полімербетонів. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. Вип. 104. 2018. С. 54–59.
3. Дворкін Л. Й., Лаповська С. Д. Будівельне матеріалознавство : підруч. Рівне : НУВГП, 2016. 448 с.
4. Березюк А. М., Ганник М. І., Папірник Р. Б., Огданський І. Ф., Мартиш О. П., Гайдар А. М. Вплив відходів хімічних виробництв на особливості полімербетонів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. Вип. 71. С. 84–88.
5. Лупир О. О. Дослідження пористої структури полімербетону на основі термореактивних фуранових смол. Методи визначення пористості. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С.19–26.
6. Березюк А. М., Ганник М. І., Папірник Р. Б., Мартиш О. П. Дослідження деформацій полімербетонів у різних середовищах за підвищених температур. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1. С. 7–14.

REFERENCES

1. Osypenko V.I., Pozdieiev S.V. and Tyshchenko I.Yu. *Budivelni materialy ta yikh povedinka pry dii vysokokh temperatur: navchalnyi posibnyk* [Building aterials and their behavior at high temperatures: a study guide]. Cherkasy, 2011, 170 p. (in Ukrainian).
2. Bereziuk A.M., Papirnyk R.B., Hannyk M.I., Martysh O.P., Ohdanskyi I.F. and Haidar A.M. *Vnutrishni napruhy v furanovykh kompozytakh i shliakhy yikh relaksatsii polimerbetoniv* [Internal stresses in furan composites and ways of their relaxation in polymer concretes] *Budivnystvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2018, iss.104, pp. 54–59. (in Russian).
3. Dvorkin L.I. and Lapovska S.D. *Budivelne materialoznavstvo : pidruchnyk* [Construction materials science : textbook]. Rivne : NUVHP Publ., 2016, 448 p. (in Ukrainian).
4. Bereziuk A.M., Hannyk M.I., Papirnyk R.B., Ohdanskyi I.F., Martysh O.P. and Haidar A.M. *Vplyv vidkhodiv khimichnykh vyrobnytstv na osoblyvosti polimerbetoniv* [The influence of waste from chemical production on the characteristics of polymer concrete]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture]. 2018, no. 71, pp. 84–88. (in Ukrainian).
5. Bereziuk A.M., Papirnyk R.B., Hannyk M.I., Martysh O.P. and Lupyr O.O. *Doslidzhennia porystoi struktury polimerbetonu na osnovi termoreaktyvnykh furanovykh smol. Metody vyznachennia porystosti* [Study of the porous structure of polymer concrete based on thermosetting furan resins. Porosity determination methods]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 3, pp. 19–26. (in Ukrainian).
6. Bereziuk A.M., Papirnyk R.B., Hannyk M.I. and Martysh O.P. *Doslidzhennya deformatsiy polimerbetoniv u riznykh seredovyshchakh za pidvyshchenykh temperatur* [Study on polymer concrete deformations in different environments at high temperature]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 1, pp. 7–14. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 11.04.2024.

УДК 725.728.69

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.75.1061

ОСОБЛИВОСТІ АРХІТЕКТУРНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

БОНДАРЕНКО О. І., *ст. виклад.*

Кафедра архітектурного проектування та містобудування, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 435-08-44, e-mail: bond.bagatel@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9835-6053

Анотація. Постановка проблеми. Активне використання джерел відновлюваної енергії та впровадження енергоефективних систем у всіх сферах життя сьогодні – це найважливіша складова майбутнього розвитку, який здатен змінити життєдіяльність і комфорт кожної людини. І дуже важливо визначити місце архітектури в цьому процесі. Аналізуючи світовий досвід архітектурної діяльності останніх десятиліть, особливо в економічно розвинених країнах, можна зазначити, що інженерно-технологічні системи альтернативної енергетики стають невід'ємною частиною різних типів будівель та комплексів, як житлових (малоповерхові, багатоповерхові), так і громадських (ділові, торгові, культурні, поліфункціональні комплекси та ін.). Альтернативна енергетика стає одним із факторів, що впливає на планування та зовнішній вигляд будівлі, вибір матеріалів та декоративне оздоблення і значною мірою – на формування об'єктів «інноваційної» архітектури. **Мета статті** – дослідити особливості архітектурного формування енергоефективних багатоповерхових будівель як результат взаємозумовленості архітектури і енергоефективних технологічних систем, на прикладі сучасних архітектурних об'єктів світу. **Висновок.** Інженерно-технологічні системи альтернативної енергетики багатоповерхових будівель, які базуються на відновлюваних джерелах енергії, забезпечують такі характеристики будівель, як екологічність, автономність, самодостатність, економічність, енергоефективність і високий рівень комфортності проживання, архітектурна індивідуальність і свобода архітектурного формування, незвичайність об'ємно-композиційних рішень архітектурних об'єктів.

Ключові слова: багатоповерхова будівля; енергоефективність; відновлювані джерела енергії; архітектурне формування; екобудівля; будівлі високих технологій

FEATURES OF ARCHITECTURAL FORM FORMATION OF ENERGY-EFFICIENT MULTISTORY BUILDINGS

BONDARENKO O.I., *Senior Lecturer*

Department of Architectural Design and Urban Planning, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (098) 435-08-44, e-mail: bond.bagatel@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9835-6053

Abstract. Problem statement. The active use of renewable energy sources and the introduction of energy-efficient systems in all spheres of life today is the most important component of future development, which can change the life and comfort of every person. And it is very important to determine the place of architecture in this process. Analyzing the global experience of architectural activity in recent decades, especially in economically developed countries, it can be noted that engineering and technological systems of alternative energy are becoming an integral part of various types of buildings and complexes, both residential (low-rise, high-rise) and public (business, retail, cultural, multifunctional complexes, etc.). Alternative energy is becoming one of the factors influencing the layout and appearance of a building, the choice of materials and decorative finishing, and significantly influencing the formation of objects of new “innovative” architecture. **Purpose of the article.** To explore the features of the architectural form formation of energy-efficient multi-storey buildings as a result of the interdependence of architecture and energy-efficient technological systems using the example of modern architectural objects in the world. **Conclusion.** Engineering and technological systems of alternative energy for multi-storey buildings, based on renewable energy sources, provide such characteristics of buildings as: environmental friendliness, autonomy, self-sufficiency, profitability, energy efficiency and a high level of living comfort, architectural individuality and freedom of architectural form formation, unusual volumetric and compositional architectural solutions objects.

Keywords: multistorey building; energy efficiency; renewable energy sources; architectural form formation; eco-building; high-tech buildings

Постановка проблеми. Активне впровадження енергоефективних систем у всіх сферах життя сьогодні – це найважливіша складова майбутнього розвитку, який здатен змінити життєдіяльність і комфорт кожної людини. І дуже важливо визначити місце архітектури в цьому процесі.

Аналізуючи світовий досвід архітектурної діяльності останніх десятиліть, особливо в економічно розвинених країнах, можна зазначити, що інженерно-технологічні системи альтернативної енергетики стають невід'ємною частиною різних типів будівель та комплексів, як житлових (малоповерхові, багатоповерхові), так і громадських (ділові, торгові, культурні, поліфункціональні комплекси тощо). Альтернативна енергетика стає одним із факторів, що впливає на планування та зовнішній вигляд будівлі, вибір матеріалів та декоративне оздоблення, на формування об'єктів «інноваційної» архітектури.

Не втратила своєї актуальності сьогодні й архітектурна «Тріада Вітрувія» «Міцність. Користь. Краса» саме тому, що завдяки активному розвитку технологій вкупі з прагматичністю ХХІ століття, «Краса» архітектури, як складова Тріади, на жаль, частіше залишається позаду, як кажуть на «другорядних ролях», а повинна йти поруч із високими технологіями та інноваціями.

Мета статті – дослідити особливості архітектурного формування енергоефективних багатоповерхових будівель як результат взаємозумовленості архітектури й енергоефективних технологічних систем, на прикладі сучасних архітектурних об'єктів світу.

Аналіз публікацій. Енергетична ефективність – це властивість будівлі, її конструктивних елементів та інженерного обладнання забезпечувати протягом очікуваного життєвого циклу будівлі побутові потреби людини та оптимальні мікрокліматичні умови для її перебування чи проживання у приміщеннях такої будівлі за нормативно допустимого (оптимального) рівня витрат енергетичних ресурсів на опалення, освітлення, вентиляцію,

кондиціонування повітря, гаряче водопостачання з урахуванням місцевих кліматичних умов.

Чим менше енергії використовує будівля для підтримки сприятливого мікроклімату в приміщенні, тим більш енергоефективний будинок [1; 3; 4].

Визначені технологічно-конструктивні вимоги щодо забезпечення високого класу енергетичної ефективності будівлі, котрі постійно оновлюються і розширюються. Це – відновлювана енергія, якісна теплоізоляція, герметична конструкція, вентиляція з рекуперацією, якість будівництва, ізоляція підлоги, потрійне енергоефективне скління, регулювання інсоляції тощо [2].

Сьогодні зроблені великі напрацювання у сфері проектування та будівництва енергоефективних будівель у багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні, що дало змогу розробити класифікаційний ряд енергоефективних будівель.

В Україні діє класифікація будівель для оцінювання енергоефективності будівель, відповідно до стандартів Європейських країн [3]:

- старі будівлі, побудовані до 1970-х років (в Україні до 2007 року), що вимагають для свого опалення і охолодження близько 300 кВт-ч /м²;

- нові, які зводилися в Європі з 1970-х до 2002 року (в Україні до 2016 р.) – 150 кВт-ч/м²; будівлі низького енергоспоживання (з 2002 р. в Європі не дозволено будівництво споруд з великим енергоспоживанням) – 60 кВт-ч/м²;

- пасивні будівлі (прийнято закон, за яким з 2019 р. в Європі не можна зводити будівлі за стандартами нижче «пасивний будинок») – 15 кВт-ч/м²;

- будинки нульової енергії (архітектурно мають ті ж самі стандарти, що і пасивні, але інженерно оснащені так, щоб використовувати тільки ту енергію, яку самі і виробляють) – 0кВт-ч/м²;

- будинки плюс енергія за допомогою встановленого на них інженерного обладнання: сонячних батарей, колекторів, теплових насосів, рекуператорів та ін. –

виробляють більше енергії, ніж самі споживають.

У сучасній практиці найбільш поширеними джерелами відновлюваної енергії для будівель стали: сонячна енергія, енергія вітру, геотермальна енергія, гідроенергія, енергія океану, біоенергія.

Відповідно до типу енергії, у проектуванні енергоефективних будівель, застосовується різне інженерне обладнання: геліоколектори, сонячні колектори, фотоелектричні перетворювачі, сонячні батареї та інші засоби отримання сонячної енергії; вітрогенератори (енергія вітру); геотермальні системи (енергія Землі); гідроелектростанції, припливно-відпливні електростанції (енергія води) та ін. [5].

Результати досліджень. На перших етапах моделювання інженерно-технологічних систем альтернативної енергетики (систем інженерного обладнання будівлі, яка забезпечує вищезазначені характеристики і, особливо, високий клас енергетичної ефективності будівлі) експериментальним об'єктом була переважно малоповерхова споруда. Вона більше нагадувала інженерний об'єкт, під час проектування якого питання планування, архітектурного формоутворення, композиції відходили на другий план.

Треба також зазначити, що об'єктом для моделювання енергоефективних технологічних систем була обрана малоповерхова будівля завдяки достатній площі покрівлі для геліосистеми, основного

технологічного елемента, який виробляє енергію, що спрощувало забезпечення високого класу енергоефективності будівлі.

Зовсім інша історія проектування енергоефективних багатоповерхових споруд.

Забезпечення енергетичної ефективності багатоповерхової будівлі вимагає комплексного підходу, а саме: використання поверхні всіх зовнішніх огорожувальних конструкцій (покрівля, стіни тощо) для інтегральних геліосистем, розроблення нових конструктивних схем огорожувальних конструкцій та інших конструктивних елементів, розроблення архітектурно-планувальних рішень, які забезпечать високі показники енергоефективності будівлі в конкретних природно-кліматичних умовах.

Формоутворення в архітектурному проектуванні – це творчий процес, що включає систему знань проектувальника в технічній, екологічній, композиційній, психологічній та інших сферах.

Розглянемо деякі об'єкти, зведені з використанням передових еко-смайт-технологій, які являють собою не лише зразки екологічності й енергоефективності, а й зразки нестандартних архітектурно-планувальних, об'ємно-композиційних та інженерних рішень.

1. *Енергоефективна офісна будівля корпорації Manitoba Hydro, Вінніпег, Канада.* «Жива будівля» з передовими технологіями, яка динамічно реагує на місцевий клімат (рис. 1) [6].



Рис. 1. Енергоефективна офісна будівля корпорації Manitoba Hydro

Архітектурна форма 21-поверхової споруди – це органічна симетрична композиція геометричних елементів,

динамічно спрямованих у небо і розкритих до сонця. Найбільш знакові технологічні особливості: «Сонячний димар», 115-м

(система пасивної (природної) вентиляції), подвійна фасадна система навісних стін, три шестиповерхові південні атріуми (легкі будівлі), водоспад (24 м) в кожному з атріумів, геотермальна система, зелений дах стилобату. Особлива увага приділена формуванню композиції внутрішнього простору будівлі.

2. Еко-будівля, яка обертається за сонцем, Фрайбург, Німеччина. Як листя та



Рис. 2. Еко-будівля Heliotrop, Фрайбург

3. Енергоефективна будівля «Elithis Tower», Діжон, Франція. Виробляє електроенергії більше, ніж споживає. На даху та фасаді 10-поверхового офісного центру розташовано 330 сонячних панелей, що виробляють електроенергію в обсязі, достатньому для освітлення, опалення та кондиціонування 54 тис. м² офісного простору (рис. 3) [8].

4. «Екобудівля» миру – «Дім Сонця і Місяця» в місті Дечжоу в Китаї. Поліфункціональний комплекс: офіси, зимовий сад, виставковий комплекс, науково-дослідні установи, навчальні заклади, конференц-зали, готель. Загальна площа будівлі – 75 000 м². Упроваджено комбіновану енергоефективну технологічну систему: сонячні колектори, фотоелектричні панелі, «теплі стелі», сезонне зберігання тепла, фотовольтаїчна світлодіодна ілюмінація, теплозберігальне скло та багато іншого. Геліосистема – це окрема конструкція дугоподібної форми, яка

квіти обертаються за сонцем, так і Heliotrop слідує за його рухом, щоб досягти максимальної ефективності використання сонячного випромінювання (рис. 2) [7]. Циліндрична, динамічна триповерхова житлова екобудівля встановлена на колоні висотою 14,5 м і діаметром 2,6 м. З одного боку будинок має потрійне скління, з іншого – добре ізольована стіна.



Рис. 3. «Elithis Tower», Діжон, Франція

забезпечує необхідну розрахункову площу для сонячних панелей загальною потужністю 20 кВт. На гігантських дугах розташовано 1 270 сонячних колекторів загальною площею 9 000 м². За рік цей будинок виробляє 36 тис. кВт-год. енергії. У підвалі розташовані два 20-тонні резервуари води, яку нагрівають сонячні колектори (рис. 4) [9].

Архітектура, дизайн, образ «Дому Сонця і Місяця» заснований на ідеї сонячного годинника.

5. Екобудівля Energy Flower – «Енергетична квітка», Китаї. Науково-дослідний центр висотою близько 140 м. Енергією екобудівля забезпечуватиметься за рахунок сонячних панелей на даху великого діаметра та вітротурбін, які будуть розміщені в середині циліндричної колони. Energy Flower буде оснащений системами збирання дощової води та її очищення. Передбачено систему природної вентиляції (рис. 5) [9].



Рис. 4. «Дім Сонця і Місяця» в Кунмі



Рис. 5. Екобудівля Energy Flower в Кунмі

6. *The Pearl River Tower* – хмарочос «Перлинна ріка», Гуанчжоу, Кунмі. 300-метрова 69-поверхова Pearl River Tower повністю автономна і сама забезпечує себе енергією, яка вироблятиметься за рахунок сонячної та енергії вітру.

Особливу увагу приділено архітектурному формоутворенню і конструктивній системі будівлі. Вона має плавну обтічну форму і побудована у формі величезного вітрила, при цьому має відмінну стійкість і здатна витримати сильний землетрус.

Прагнучи створити один із найбільш енергоефективних хмарочосів у світі, компанія SOM включила новітні стійкі технології та інженерні ноу-хау до проекту вежі Pearl River Tower. Усередині та зовні дизайн втілює ідею існування людства в гармонії з навколишнім середовищем, при цьому значно підвищуючи енергоефективність та комфорт.

Енергоефективна технологічна система комбінована й інтегрована в об'єм будівлі.

Аеродинамічна форма вежі розроблена завдяки ретельному вивченню особливостей сонячної радіації та вітру навколо об'єкта. Скульптурний корпус спрямовує вітер в отвори на технічних поверхах, де встановлені вітрові турбіни. Конструкція будівлі оптимізує шлях сонячної енергії.

Енергія виробляється і за допомогою фотоелектричних панелей фасаду. Сонячні теплові колектори нагрівають воду для потреб хмарочоса. Фасадна система із скла не тільки накопичує енергію, а й захищає саму будівлю від перегрівання. Спеціальне

подвійне скління південного фасаду знижує нагрівання будинку. Жалюзі на вікнах автоматично змінюють свій кут для забезпечення оптимального освітлення протягом усього дня, що зменшує витрати на кондиціонування. У конструкції підлог передбачена система охолодження: спеціальними трубами тече холодна вода, яка забезпечує швидке кондиціонування повітря в приміщеннях. Вода для цієї системи надходить із даху, де встановлені спеціальні збірники для дощової води (рис. 6) [10].

7. *The Bahrain World Trade Center Towers* – Башти всесвітнього торговельного центру Бахреїну. Світовий торговий центр Бахреїну – це символ екологічності, сталого дизайну та інженерії. Будівля включає першу установку великогабаритних вітряних турбін в комерційній будівлі.

Форма хмарочоса дозволяє створювати прискорені потоки повітря для гігантських лопатей турбін. Унікальний для цієї будівлі проект, що об'єднує рішення у галузі відновлюваних джерел енергії зі стійкою архітектурою, передбачає три вітряні турбіни діаметром 29 м, які горизонтально підтримуються між двома вежами.

Профілі вітрил двох веж спрямовують береговий бриз між ними, а також створюють підйомну силу позаду, тим самим прискорюючи швидкість вітру між двома конструкціями. Кожна вежа, що звужується до висоти 240 м, візуально прикріплена до землі гармошкою вигнутих, схожих на вітрила форм (рис. 7) [11].



Рис. 6. Хмарочос «Перлинна ріка», Китай



Рис. 7. Бапти торговельного центру Бахрейна

У Європі все частіше для розміщення сонячних панелей використовують, крім дахів, фасади будівель і споруд, для сонячної генерації – це вкрай перспективний напрямок. Експерти пророкують бум упровадження сонячних панелей у будівельні фасадні матеріали.

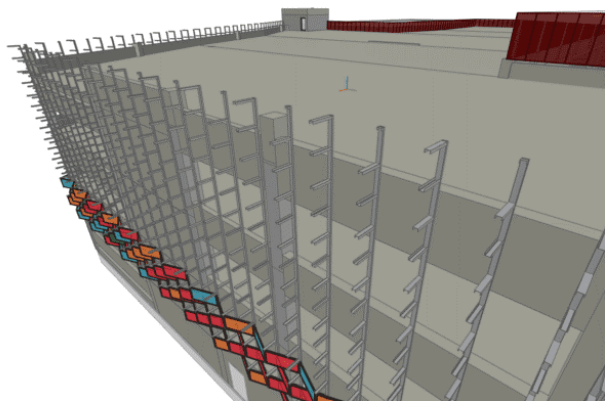
8. Будівлі високих технологій – Фасадна електростанція. Шведська компанія Soltech Energy змонтувала на фасаді паркінгу сонячні панелі. Фасад, як джерело енергії, розроблений з урахуванням необхідної

циркуляції повітря для вентиляції внутрішнього простору та охолодження сонячних панелей.

Фасадна електростанція складається з напівпрозорих безрамних панелей зі скла з прозорістю 40 % і потужністю 60 кВт. Електроенергія призначена для живлення 300 зарядних пристроїв для електромобілів. У цьому їй допомагає традиційна сонячна електростанція, розміщена на даху гаража. (рис. 8) [12].



Рис. 8. Фасадна електростанція, паркінг, Шведська компанія Soltech Energy



9. Будівлі високих технологій – Сонячні фасади (Solar Facades). Сонячні фасади Данської компанії SolarLab інтегрують виробництво енергії в оболонку будівлі і замінюють як традиційне облицювання

фасаду, так і непривабливі фотоелектричні установки на даху. Це звільняє площі дахів для керування дощовою водою, зелених дахів, що поліпшують біорізноманіття, одночасно окупаючи інвестиції. Сонячні

фасади пропонують свободу дизайну у виборі панелі та геометрії монтажу, а також кольори, оздоблення та текстури.

Сонячні фасади – це економічний та красивий спосіб створити й реалізувати

архітектуру з нульовими викидами та отримати високі екологічні сертифікати.

Потреба у значній площі геліосистем зумовлює появу незвичайних об'ємно-композиційних рішень архітектурних об'єктів (рис. 9) [13].



Рис. 9. Будівлі високих технологій – Сонячні фасади (Solar Facades)

10. Біоенерготехнології. «Водоростевий» фасад «зеленої» архітектури. Німецька фірма Splitterwerk Architects спроектувала будинок, зовнішні панелі якого – це фотобіореактори з хлорелою всередині. Панелі будуть виробляти біопаливо, одночасно знижуючи витрати на охолодження споруди влітку. Водоростевий фасад оснащений зовнішніми жалюзі, що закривають фотобіореактори вночі для скорочення теплових втрат.

Оскільки фотобіореактори певною мірою прозорі, вони замінюють частину вікон, знижуючи витрати на освітлення внутрішніх приміщень.

Передбачено утилізацію стічних вод будівлі для насичення живильного середовища фотобіореакторів та прискорення розвитку водоростей (рис. 10) [14].



Рис. 10. «Водоростевий» фасад «зеленої» архітектури, Splitterwerk Architects

11. Будівлі високих технологій – фасад Копенгагенської міжнародної школи – найбільша сонячна електростанція. Головна особливість об'єкту – фасад, який «за сумісництвом» є сонячною електростанцією.

Ця електростанція вироблятиме приблизно 300 мегават-годин електроенергії

на рік, забезпечуючи близько половини енергетичних потреб школи.

Колір сонячним модулям надається у процесі інтерференції світла (фарба не використовується). Інтерференція світла – один із способів фарбування.

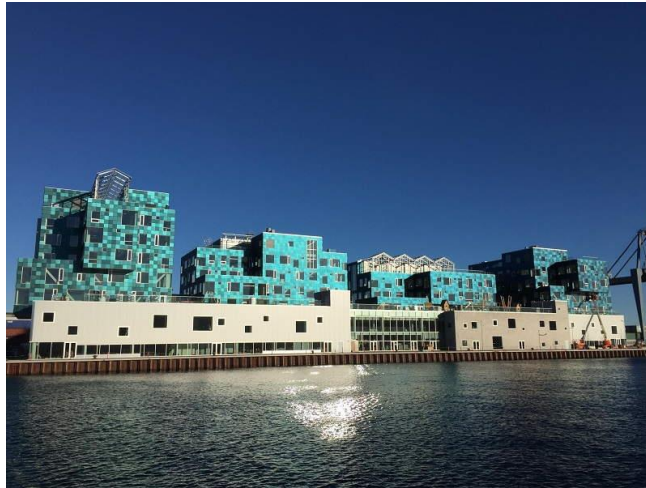


Рис. 11. Копенгагенська міжнародна школа – найбільша сонячна електростанція

Для колерування використовуються спеціальні фільтри, які наносяться на скляні панелі. Конструкція фільтра визначає, світлові хвилі якої довжини відобразяться як видимий колір. Решта сонячного світла поглинається сонячною панеллю і перетворюється на енергію (рис. 11) [15].

Висновки.

Розвиток інноваційних екосмарт-технологій, що забезпечують енергоефективність багатоповерхових будівель, відкриває нові можливості і новий погляд на архітектуру майбутнього. Базуючись на аналізі сучасного досвіду проектування і будівництва енергоефективних багатоповерхових будівель і комплексів, можна зазначити, що склалися умови для формування типологічного ряду енергоефективних багатоповерхових споруд: енергоефективна екобудівля, будівлі високих технологій, біотехнологій тощо.

Інженерно-технологічні системи альтернативної енергетики багатоповерхових будинків, які базуються на відновлюваних джерела енергії, забезпечують такі характеристики, як: екологічність, автономність, самодостатність, економічність, енергоефективність і високий рівень комфортності проживання, архітектурну індивідуальність і свободу

архітектурного формоутворення, незвичайність об'ємно-композиційних рішень архітектурних об'єктів.

Енергоефективна технологічна система багатоповерхової будівлі комбінована й інтегрована в її об'ємно-планувальну структуру, що забезпечує взаємозумовленість архітектурного формоутворення та інженерно-технологічного рішення системи альтернативної енергетики.

Так, пластика фасаду, габарити і форма будівлі проектується з урахуванням направленості потоків повітря на вітрогенератори, які вбудовані в конструкцію споруди. Забезпечення енергоефективності багатоповерхового будинку впливає на габарити, геометрію плану, форму оболонки будівлі, конструкцію огорожувальної поверхні (стіни, покрівля) та інших елементів, конструктивну систему.

Формування оптимальної та економічної системи вентиляції і кондиціонування спонукає до пошуку нестандартних архітектурно-об'ємних і композиційних рішень окремих елементів і будівлі в цілому. Альтернативна енергетика стає одним із факторів, що впливає на планування та зовнішній вигляд споруди, вибір матеріалів та декоративне оздоблення і, значною мірою, на формоутворення об'єктів «інноваційної» архітектури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергоефективний будинок. URL: <https://termobud.com.ua/ua/news/energoeffektivniy-dom.html>
2. Енергоефективність: що це і як впливає на комфорт проживання. URL: <https://nerukhomi.ua/news/energoeffektivnost-cto-eto-takoe-i-kak-vliyaet-na-komfort-prozhivaniya.htm>

3. Енергоефективність будівель в Україні. URL: <https://dergbud.org.ua/enerhoefektyvnist-budivelua.html>
4. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. Київ, 2017. URL: https://dbn.co.ua/dbn/DBN_V.2.6-31-2016_Teplova_izolyatsiya_budively.pdf
5. Енергонезалежні будівлі та відновлювальні джерела енергії. URL: <https://www.civilbud.com.ua/index.php/articles/tehnologii/315-energonezalezni-budivli-ta-vidnovlualni-dzherela-enerгии>
6. Manitoba Hydro. KPMB Architects. URL: <https://www.archdaily.com/44596/manitoba-hydro-kpmb-architects>.
7. Фрайбург – приклад сталого енергоефективного розвитку. URL: <https://caxapa.ua/kompaniya-statti-frajburg-priklad-stalogo-energoefektivnogo-rozvitku-mista>
8. Елітис Таур. URL: <https://www.arte-charpentier.com/en/projects/elithis-tower/>
9. Екологічні будівлі. URL: <https://svitppt.com.ua/ekologiya/top-naycikavishih-novin-pro-ekologichne-budivnictvopidgotuvav-balabuha-d.html>
10. Башта перлиної річки. URL: <https://www.som.com/projects/pearl-river-tower/>
11. Світовий торговий центр Бахрейну. URL: <https://www.arch2o.com/bahrain-world-trade-center-kill-design/>
12. У Швеції створили сонячний фасад для заряджання електромобілів. URL: <https://eenergy.media/news/19790>
13. Сонячні фасади «Solar Facades». URL: <https://hvoya.wordpress.com/2023/02/15/solarlab>
14. У Німеччині будується сама «зелена» будівля у світі. URL: <https://bin.ua/news/economics/economic/134619-v-germanii-stroitsya-samoe-zelyonoe-zdanie-v-mire.html>
15. Copenhagen International School. URL: <https://www.archdaily.com/879152/copenhagen-international-school-nordhavn-cf-moller>

REFERENCES

1. *Enerhoefektyvnyy budynok* [Energy efficient house]. URL: <https://termobud.com.ua/ru/news/energoeffektivnyy-dom.html> (in Ukrainian).
2. *Enerhoefektyvnist': shcho tse i yak vplyvaye na komfort prozhyvannya* [Energy efficiency : what it is and how it affects living comfort]. URL: <https://nerukhomi.ua/news/energoeffektivnost-cho-eto-takoe-i-kak-vliyaet-na-komfort-prozhivaniya.htm> (in Ukrainian).
3. *Enerhoefektyvnist' budivel' v Ukrayini* [Energy efficiency of buildings in Ukraine]. URL: <https://dergbud.org.ua/enerhoefektyvnist-budivelua.html> (in Ukrainian).
4. *DBN V.2.6-31:2016. Teplova izolyatsiya budivel'* [DBN V.2.6-31:2016. Thermal insulation of buildings]. Kyiv, 2017. URL: https://dbn.co.ua/dbn/DBN_V.2.6-31-2016_Teplova_izolyatsiya_budively.pdf (in Ukrainian).
5. *Enerhonezalezni budivli ta vidnovlyual'ni dzherela enerhiyi* [Energy-independent buildings and renewable energy sources]. URL: <https://www.civilbud.com.ua/index.php/articles/tehnologii/315-energonezalezni-budivli-ta-vidnovlualni-dzherela-enerгии> (in Ukrainian).
6. Manitoba Hydro. KPMB Architects. URL: <https://www.archdaily.com/44596/manitoba-hydro-kpmb-architects>
7. *Frajburh – pryklad staloho enerhoefektyvnoho rozvytku* [Freiburg is an example of sustainable energy-efficient development]. URL: <https://caxapa.ua/kompaniya-statti-frajburg-priklad-stalogo-energoefektivnogo-rozvitku-mista> (in Ukrainian).
8. *Elitys Tauer* [Elytis Tower]. URL: <https://www.arte-charpentier.com/en/projects/elithis-tower/> (in Ukrainian).
9. *Ekolohichni budivli* [Ecological buildings]. URL: <https://svitppt.com.ua/ekologiya/top-naycikavishih-novin-pro-ekologichne-budivnictvopidgotuvav-balabuha-d.html> (in Ukrainian).
10. *Bashta perlynoyi richky* [Pearl River Tower]. URL: <https://www.som.com/projects/pearl-river-tower/> (in Ukrainian).
11. *Svitovyy torhovyy tsentr Bakhreynu* [Bahrain World Trade Center]. URL: <https://www.arch2o.com/bahrain-world-trade-center-kill-design/> (in Ukrainian).
12. *U Shvetsiyi stvoryly sonyachnyy fasad dlya zaryadzannya elektromobiliv* [A solar façade for charging electric vehicles was created in Sweden]. URL: <https://eenergy.media/news/19790> (in Ukrainian).
13. *Sonyachni fasady "Solar Facades"* [Solar facades "Solar Facades"]. URL: <https://hvoya.wordpress.com/2023/02/15/solarlab> (in Ukrainian).
14. *U Nimechchini buduyet'sya sama "zelena" budivlya u sviti* [The greenest building in the world is being built in Germany]. URL: <https://bin.ua/news/economics/economic/134619-v-germanii-stroitsya-samoe-zelyonoe-zdanie-v-mire.html> (in Ukrainian).
15. Copenhagen International School. URL: <https://www.archdaily.com/879152/copenhagen-international-school-nordhavn-cf-moller>

Надійшла до редакції: 30.03.2024.

УДК 130.2+304.44

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.84.1062

ПЕРЕТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ОЗЕЛЕНЕНИХ ТЕРИТОРІЙ м. ДНІПРО В УМОВАХ ПОДАЛЬШОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕКЗОГЕННИХ, ЕНДОГЕННИХ ТА АНТРОПОГЕННИХ ФАКТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

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

^{1*} Кафедра архітектурного проектування та містобудування, 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, 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. Зміни ендегенних процесів, (пов'язаних з новим циклом руху енергії всередині Землі, наслідком чого стали зміни в характеристиках неотектоніки, сейсміки та в інших процесах), трансформації екзогенних факторів (пов'язаних із зовнішніми, космічними силами – радіацією, гравітацією, іншими, джерелами яких є, в першу чергу, цикли активності Сонця та інших космічних об'єктів), та антропогенних процесів (які теж входять до нового циклу зміни підходів до функціональної, структурно-планувальної та об'ємно-композиційної організації міст), а також зміни у біології, енергетиці та ментальності людей, та зміни у інших форм життя і на планеті, і в кожному з регіонів України, включаючи Дніпропетровську область, швидко прогресують. Строки початку змін різні. Проте загалом вони активізувалися в останній чверті ХХ – на початку ХХІ століття. Це викликає потребу перегляду підходів до перетворення системи озелених територій міст. У тому числі – Дніпра. 14 вересня 2020 року в Україні введено в дію рішення Ради національної безпеки та оборони України «Про Стратегію національної безпеки України». Розроблено «Стратегію екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату» на період до 2030 року. Є також «Методичні рекомендації щодо здійснення стратегічної екологічної оцінки для містобудівної документації». Розроблено регіональні документи у контексті сказаного. Однак усі вони не враховують великої групи явищ, що визначають функціонування системи озеленення міста, які є первинними по відношенню до норм, представлених в офіційних джерелах. **Мета статті** – розглянути підходи до концепції перетворення системи озелених територій м. Дніпро на сучасному етапі його екологізації на основі подальшої трансформації ендегенних, екзогенних та антропогенних факторів сталого розвитку міста.

Ключові слова: озеленені території міста; сталий розвиток міста; ендегенні, екзогенні та антропогенні фактори; трансформація; природна та антропогенна підсистеми міста

RECONSTRUCTION OF THE SYSTEM OF GREENING TERRITORIES OF THE DNIPRO AREA IN THE MINDS OF FURTHER TRANSFORMATIONS OF EXOGENIC, ENDOGENIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS OF THE OLD DEVELOPMENT

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

^{1*} Department of Architectural Design and Urban Planning, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., 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, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (098) 212-48-80, e-mail: olgashilo2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9869-5474

Abstract. Raising of problem. As a result of the financial and economic crisis, many industrial enterprises have ceased operations or significantly reduced production volumes due to the shrinking markets for their products, which is

accompanied by destructive processes and phenomena. In a dynamic competitive environment, some enterprises have outdated and worn-out fixed assets, their products are not in demand, their premises are leased, large areas are covered with waste and harmful substances that are environmentally hazardous, low technological level of production, weak scientific and technical sphere, and reduced supply of labour resources. Therefore, ensuring sustainable development of Ukraine is impossible without solving the problems of restructuring and qualitative renewal of industrial production, reconstruction of degraded urban areas occupied by abandoned buildings and structures of industrial enterprises. Thus, there is an objective need to increase the level of profitability of land development by justifying alternative land use options: demolition of degraded industrial enterprises and construction of new facilities or reconstruction of industrial buildings and structures with a change of functional purpose. However, there is currently no unified approach to building an information model of the decision-making process for the reconstruction of industrial enterprises with a change in their functional purpose. Translated with DeepL.com (free version). **Purpose of the article.** To develop an improved decision-making algorithm for the reconstruction of mining enterprises with a change in functional purpose. **Conclusion.** The decision-making algorithm for the reconstruction of industrial enterprises with a change in functional purpose, which ensures the receipt of substantiated values of technical and economic indicators of such projects, depending on the available initial information about the object and the conditions of production of works, and also provides the possibility of specifying the values indicators of the effectiveness of managerial decisions at different stages of the life cycle, thanks to the adjustment of the values of the duration and cost of reconstruction by varying the parameters that are part of the determining factors.

Keywords: *decision-making; algorithm; block diagram; reconstruction; sustainable development; rationalisation*

«Виживає не найсильніший з видів і не найрозумніший, а той, хто краще за інших реагує на зміни» (Чарльз Дарвін)

Постановка проблеми. Зміни ендегенних, екзогенних та антропогенних процесів і на планеті, і в кожному з регіонів України, включаючи Дніпропетровську область, що розпочалися в останню чверть ХХ століття, продовжуються і у ХХІ столітті, швидко прогресуючи. Це викликає потребу перегляду підходів до перетворення системи озелених територій міст [2; 6], у тому числі Дніпра. Або, інакше, потребу перегляду концепції сталого розвитку населених місць, що спирається і на нову матрицю диференціації лісорослинних та пов'язаних із ними інших об'єктивних якостей регіону, які раніше не існували. Швидкість таких змін зростає. У зв'язку зі змінами ще до війни сільське господарство країни, наприклад, уже було переведене на сівозміни, властиві більше південним регіонам. Зазнають трансформацій також інші галузі економіки України [4; 5].

Мета дослідження – розробити концепцію перетворення системи озелених територій м. Дніпро на сучасному етапі його екологізації на основі змін в його природній та антропогенній підсистемах.

Аналіз публікацій [1–7] та натурні обстеження показав: у зв'язку з тим, що зелені насадження як у природних умовах,

так і в структурі міст залишаються елементами природного або антропогенного біоценозу, який пов'язаний із змінним екоотопом, є можливість розглянути фактори, що впливають на морфологічні, архітектурно-ландшафтні характеристики як планового обрису, так і об'ємно-композиційного наповнення озелених територій міста, а також питання їх комплексної взаємодії, на базі чого сформулювати нову концепцію підходів до перетворення системи озелених територій Дніпра на етапі його екологізації.

У складі факторів такі:

– аридизація клімату (з таненням арктичних та антарктичних льодів та підйомом рівня світового океану);

– зростання мікросейсміки регіонів та активізація неотектонічних процесів, що спричиняють підйом одних ділянок території міста та опускання інших, а також зростання щільності розривних структур в архейських гранітопорфірах під нашим містом;

– зміна малюнка впливу астропланетарних проєкцій на рослинний склад регіону;

– подальший вплив на рослини наслідків прецесії Земної осі;

– загальне піднесення частотного діапазону функціонування планети Земля у зв'язку з переходом у 2012 році галактичного екватора, який змінює частоти функціонування рослин;

– посилення показників космічної радіації, що надходить на поверхню Землі та викликає мутації, що які або спричиняють смерть, або викликають появу нових форм життя у багатьох живих організмів;

– активізація під містами так званого чорного шуму, що руйнує живі організми;

– підвищення активності та зміна морфології діаграм направленості енергоінформаційних випромінювань (у тому числі – в діапазоні так званих «полів форми»), генерованих будівлями та спорудами.

Довідка. З давніх-давен люди знали, як визначити чергову зміну ніби «невидимих» людиною перебудов енергопотоків, хімічних розчинів у ґрунтах та всіх інших процесів у ґрунтах, в атмосфері, у водних об'єктах за реакцією рослин (дерев, чагарників, трав, мікророслинних форм).

Нагадуємо, як виглядали такі реакції, які легко побачити навіть без наукових приладів, як це робилося в давнину. Прилади дозволять оцінити ці явища в діапазонах кількісних значень і в діапазонах інших особливостей поведінки рослинних форм життя як в умовах природного ландшафту, так і на територіях із міським, антропогенним ландшафтом.

Детекторів змін у середовищі сотні, а за окремими показниками – тисячі. Зрозуміло, що це давно стало окремою галуззю народних знань і в рамках цієї статті не описуватиметься. Але деякі приклади все-таки наведемо. Однак спочатку дамо таке узагальнення: будь-які відхилення геометричних абрисів форм стовбурів, гілок, листів, квітів і розмірів плодів або насіння від норми, властивої даному виду рослин, завжди потрібно сприймати як вказівку на те, що це місце змінило свої властивості і починає руйнувати цю рослину (рис. 1–8).

Серед індикаторів змін і багато супутніх живих організмів: комах, птахів, дрібних тварин, жуків та багатьох-багатьох інших.

Їхні нори в землі біля дерев, гнізда на деревах, їхні траєкторії руху по землі та під землею або польоти в повітрі (ящірок, мурах, бабок, метеликів, жуків та багатьох інших) завжди пов'язані з рослинами певних груп. Але щойно умови життя рослин змінюються, змінюють свої прив'язки до них інші форми живих організмів. Значців цих процесів у наш час дуже небагато. Але вони безпомилково одразу визначають за виглядом рослин, що саме відбувається з хімічною структурою ґрунтів, підземних та поверхневих вод, з іншими факторами.



Рис. 1, 2. Явища дендрологічної дихотомії: два стовби ростуть з одного кореня, як латинська буква «V» (один із стовбів сплящий). Ефект виникає в таких типах аномальних зон, тригодинне перебування людини в яких запускає в її організмі онкологію (світлина зліва). Ефект закручування стовбів за схемою обвивання один одного; а в разі одного дерева – виникнення спіралеподібного ефекту закручування стовбура, за правилом буравчика – за або проти годинникової стрілки, залежно від різних обставин. З появою мандорл – за висотою ствола. Ефект правого або лівого спіну при закрученні стовбів – серйозний показник змін у середовищі. Він також маніфестує зміну лісорослинних умов на такі, які теж тепер небезпечні для людей (світлина праворуч)

Всі ці знання сягають глибини історії, коли на Землі існувала, згідно з давніми текстами, єдина планетарна ведична цивілізація. Однак, у разі потреби сучасного наукового підходу до дослідження рослинних організмів у місті або за його межами, потрібно використовувати відповідні прилади.



Рис. 3–7. Утворення потовцень на стовбурі дерева, конфігурація яких залежить від породи та від типу трансформації лісорослинних умов; різноманітність видів потовцень, їх геометричних абрисів і розмірів дуже велика (світлина зверху зліва)

Виникнення порожнього простору в серединній зоні ствола майже по всій його висоті – феномен, про який можна було б написати не одну статтю для архітекторів. Він виникає не через гниття серцевини стовбура дерева, через що його потрібно спилувати, щоб стовбур при поривах вітру не впав на людей, на будинки або на машини, як про це пишуть у книгах для

працівників міськзеленбуду. Гниття – лише наслідок (світлина праворуч угорі).

Причина в тому, що всередині ствола за впливу космічних факторів, що змінилися, електричний потік та інші види енергопотоків інверсують. Тобто з низхідних вони перетворюються на висхідні. І антенувальний ефект біопольової структури дерева стає іншим. Стовбур дерева починає виконувати програму вивертання матеріальної частини знизу нагору. На образно-алегоричному порівнянні – ніби вивертається панчоха.

Неправильна, деформована в плані, яка вельми помітно відійшла від правильного кола, форма перерізу стовбура (світлина під верхньою парою знімків), а також явище приствольної кореневої свастики за або проти годинникової стрілки, або прояв морфології стовбурів за типом «корона» – нижній знімок) – не менш інтригуючі явища, що вказують на зміну лісорослинних умов за впливу зміни астропланетарних обмінних зв'язків ґратчастого типу, що існують між Землею та Космосом. (З досліджень авторів статті).



Рис. 8. «Епідемія» гібридних прикореневих мандорл – це один показник змін середовища. Фактично, це дерева вже іншого світу. Наш світ – вже не наш світ

Вивчення таких явищ (рис. 9–17) дає багато повчального у нашому пізнанні навколишнього світу. Наприклад, приводить до такого висновку: за допомогою тих чи інших морфологічних змін на стовбурі, коренях, гілках, дерево змінює в собі тип антенування. Тобто тип приймально-передавальної антени, якою воно є. Розуміння антенувального ефекту дерева або чагарнику очевидно можна досягти тільки після того, як дослідник зелених насаджень міста освоїть розділ фізики,

пов'язаний зі створенням антен різних типів. З цієї точки зору будь-яка зміна лісорослинних умов дає зміни антенувальних явищ у рослинних угрупованнях, що вимагає спеціального картування та подальшого дослідження з точки зору взаємодії із забудовою та людьми.

Зміни довжин хвиль викликають зміни малюнка антени, і навіть її діаграми спрямованості. Тобто створюють новий варіант взаємодії із середовищем.



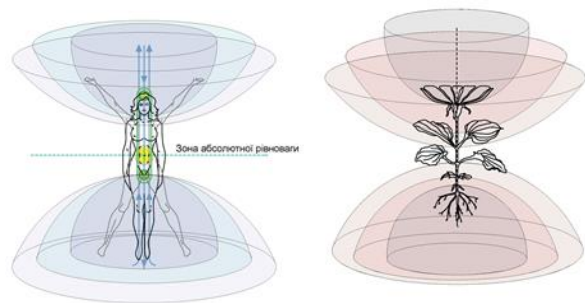
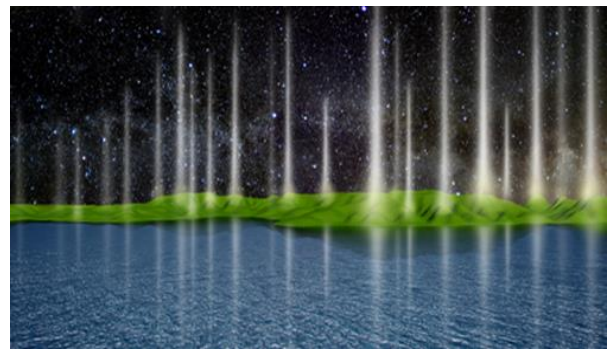
Рис. 9. Квіти – класичний вид антен у природі

Форми дерев і форми будівель у контексті сказаного виникають як вкладиші у східні та західні енергетичні потоки. З ними і повинна входити в резонанс біопольова анатомія людини.

Колір електромагнітної хвилі, що народжується елементом рельєфу, залежатиме від кута нахилу бічної поверхні цієї форми рельєфу, від його загальної геометрії та від положення в сітчастоподібній структурі силового каркаса планети.



Рис. 10. Головні екологічно-містобудівні таємниці минулого і майбутнього, у трактуваннях поняття «простір» у космогонії, квантовій механіці, петлевої теорії квантової гравітації та інших теоріях. Це було описано в стародавніх книгах. І це ж наново відкривається сучасним вченим. Вони розкривали специфіку антенуючих взаємодій всіх зі всьома. Потім це було загублено. Тому поки це світ сучасної цивілізації – це світ еволюції помилок



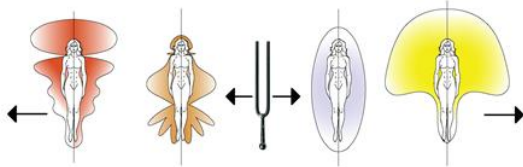


Рис. 11–15. Візуалізація морфології електромагнітних променів, що генеруються (осцилюються) опуклими формами рельєфу (пагорбами, смугами вододілів), кожен з яких функціонує у своїй довжині хвилі електромагнітного спектра та визначає антенувальні принципи життя кожної людини та кожної рослини (З досліджень авторів статті)

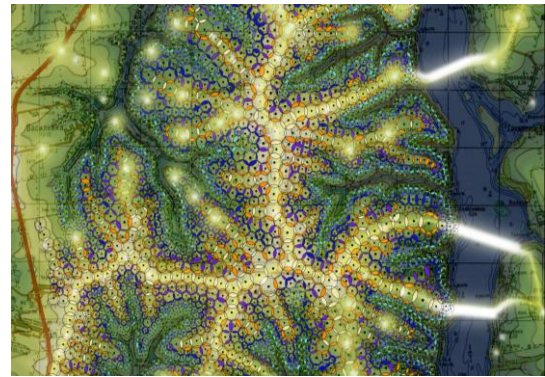
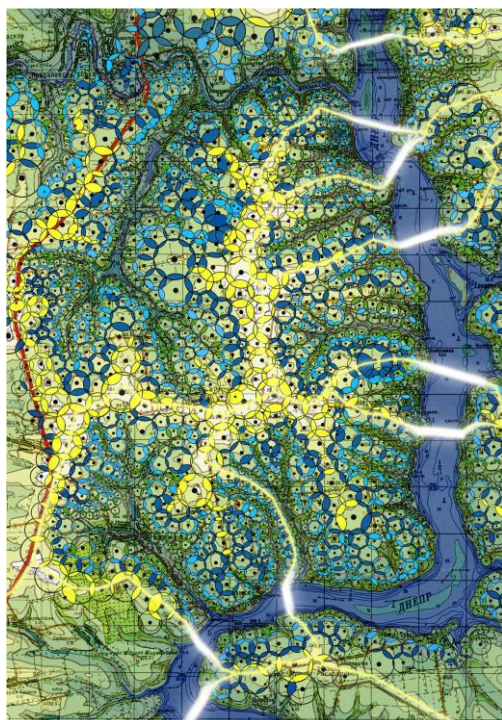


Рис. 16, 17. Розповсюдження точок осциляції на одній із правобережних ділянок Дніпра південної частини його приміської зони (З досліджень авторів статті)

Форми дерев і форми будівель у контексті сказаного виникають як вкладиші у вертикальні енергетичні потоки. З ними і повинна входити в резонанс біопольова анатомія людини.

У зв'язку з глобальними змінами в природі довжини хвиль електромагнітного спектра, що впливають на видовий склад рослин та їх анетенційні схеми функціонування, у кожного осцилятора переходять на нові морфотвірні ритми та цикли. Іншими словами, і з цього погляду, і з погляду врахування інших факторів, що визначають життя рослин, настає час, коли потрібно заново вивчити ці процеси, і на основі результатів такого вивчення написати підручники та довідники з нової ботаніки, нової дендрології, нової біології в цілому. Оскільки змінюється і енергоінформаційна анатомія людини, вона потребує таких раніше не існуючих моделей взаємодії з рослинами і з природою в цілому. У людини виникають принципово інші рефлексії, які раніше не існували (З матеріалів досліджень Воробйова В. В. та Шило О. С.).

Розглянемо все детальніше.

1. Аридизація клімату викликає необхідність заміни частини порід деревних та чагарникових насаджень, а також ряду видів трав'янистих рослин на види, властиві півдню України; істотно спрощуються всі ієрархічні рівні, а також горизонтальна, вертикальна та інші структури екосистем; аридизація знижує пороги їх стійкості до антропогенних навантажень; змінює фітонцидність у повітряному басейні;

змінює характеристики мікроклімату; змінює режим підземних та поверхневих вод; змінює сітку меж таксонів внутрішньоландшафтної топології; різко знижує стійкість таксонів внутрішньоландшафтної топології до природних та антропогенних навантажень (рис. 18).

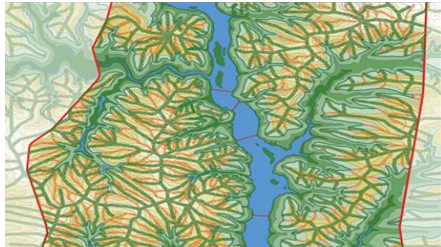


Рис. 18. Приклад матриці складних урочищ як одного з ієрархічних рівнів таксонів внутрішньоландшафтної топології у південній частині приміської зони м. Дніпро

Кожному урочищу притаманні свої види зелених насаджень, свої особливості їх взаємодії між собою та з людиною. У кожній фації існують свої лісорослинні умови, викликані відмінностями у висотах відміток рельєфу, відмінностями у експозиції, геометричній формі, геофізиці і геохімії, а також іншими відмінностями.

У цілому морфологічна структура ландшафту і в місті, і в його приміській зоні включає особливі складові природних або антропогенних геосистем локальної розмірності, які і називаються морфологічними (топологічними) одиницями всередині природного ландшафту як останньої ланки диференціації території за впливу ендегенних та екзогенних факторів, «помножених» на вплив антропогенних факторів; взаєморозташування антропогенних та природних морфологічних одиниць територіальної організації ландшафту, або, інакше – парагенетичну спряженість та планограму обмінних зв'язків, включаючи літеральний обмін між морфологічними одиницями. Все це спричиняє перебудову структури зелених насаджень.

Зараз адитивний ефект змін зумовлює пересихання та повне зникнення малих річок та струмків; підвищення рівня

засоленості ґрунтів; змінює електролітичні явища у структурі водоносних горизонтів, а також їх кількість та водонасиченість; викликає різке зниження кисню в ґрунтах, що спричинює загибель кореневих систем рослин усіх породних та видових груп; змінює картограми розподілу алергічних реакцій у людей; бактерицидний фон у повітряному басейні, у ґрунтах та в гідросистемах; викликає зміну хімічного складу підземних та поверхневих вод; зміни в морфології та режимі активності регулярних геобіологічних систем, меридіональні та широтні смуги яких починають інакше впливати на рослинні та інші форми життя, включаючи людину.

Наразі десятки видів регулярних геобіологічних мереж (Хартмана, Куррі, Пейве, Стальчинського, Вінтера, та всіх інших), ієрархічно вкладених одна в одну, за впливу трансформації астропланетарних факторів змінюють ширини своїх смуг, розміри та геометрію осередків, інтенсивність циклів активності та пасивності, способи домінування в ієрархії, правила взаємодії з плановими контурами форм поверхні рельєфу та багато інших параметрів (рис. 19, 20), які автоматично викликають зміни свого впливу на склад зелених насаджень міста та особливості формування за їх допомогою геобіоценозів.

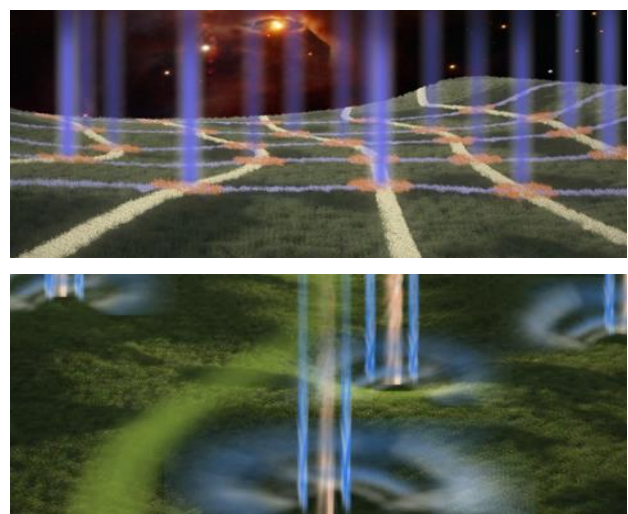


Рис. 19. Приклад візуалізації невидимих звичайним зором людини (якщо не брати до уваги людей, обдарованих екстрасенсорним зором) випромінювань деяких видів регулярних геобіологічних мереж

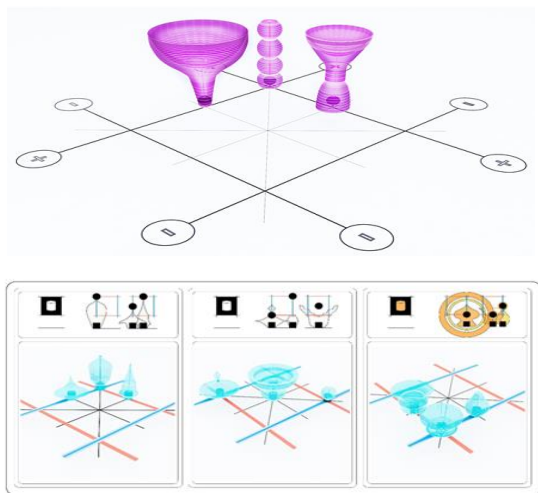


Рис. 20. Методичний приклад демонстрації зміни морфології електромагнітного поля навколо дерева, залежно від його місця становища на одній із дрібних ортостіток силового каркаса Землі (З досліджень Воробйова В. В.)

Кожна з варіацій поля має суттєві відмінності впливу як на саме дерево, так і на людину, яка буде поруч. У будь-якому випадку це приклад виникнення антенувальних ефектів різних типів. Точніше – приклад переходу на антенувальне ландшафтно-дендрологічне проектування системи озеленення міста. Підкреслимо: за адекватного підходу до такого завдання в основі рішення лежатимуть тіла обертання. Жодних деформацій дерев, приклади яких вибірково представлені на початку статті, не виникатиме.

Зміни стосуються також перебудови схем поясної і секторної поляризації випромінювань, що генеруються формами рельєфу (рис. 21). Форми орографії – теж антени.

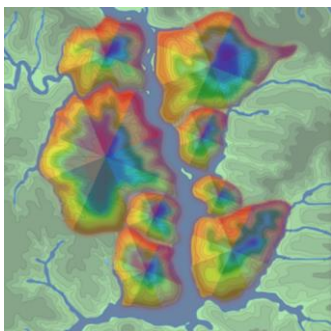


Рис. 21. Вертикально-поясна та секторна поляризація електромагнітних властивостей геоморфологічної структури місцевості (З розробок Воробйова В. В.)

Виникають нові співвідношення між окремими елементами поляризації по висоті та в плані, які суттєво змінюють особливості формування видового складу рослин в антропогеобіоценозах міста та у його приміській зоні.

Строго кажучи, тепер вся територія міста та його навколишніх просторів – це ареал тотальної невідповідності форм живих організмів умовам життя, що змінюються. Тут доречно згадати мудре висловлювання Чарльза Дарвіна: «Вживає не найсильніший з видів і не найрозумніший, а той, хто краще за інших реагує на зміни».

Алегорично вимальовується тема, яку можна назвати так: ЗЕМЛЯ: ОСТАННІЙ КОНФЛІКТ обмінних екосистемних зв'язків. Мається на увазі глобальний, регіональний та локальний конфлікти між умовами для життя та формами самого життя, включаючи форми рослин та людини.

Довідка. «Земля: останній конфлікт» – назва фантастичного художнього серіалу, створеного кінематографістами США, Канади та Німеччини у 1997 році.

Продовження морфологічних змін різної генези викликає різке зниження кисню в ґрунтах, що спричинює загибель корневих систем рослин усіх породних та видових груп; викликає зміни картограми розподілу алергічних реакцій у людей; змінює бактерицидний фон у повітряному басейні, у ґрунтах та в гідросистемах; викликає зміну хімічного складу підземних та поверхневих вод; викликає зміни в морфології та режимі активності регулярних геобіологічних систем, меридіональні та широтні смуги яких починають інакше впливати на рослинні та інші форми життя, включаючи людину; змінює інтерференційні малюнки електромагнітних полів, що генеруються осциляторами – опуклими формами рельєфу (рис. 22–25).



Рис. 22. Приклад візуалізації деяких видів випромінювань, що йдуть від пагорбів, на основі яких утворюються явища тривимірної інтерференції полів у просторі тієї чи іншої території. Зміни ефекту відбуваються у зв'язку з підйомом одних і опусканням інших ділянок місцевості зі швидкістю до 4 см за рік

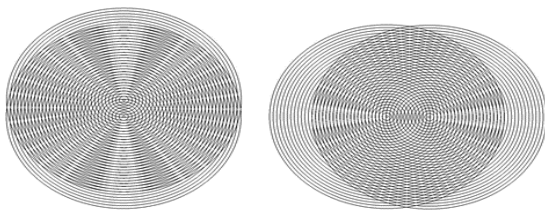


Рис. 23. Принципова схема виникнення змін у малюнку інтерференції електромагнітної матриці у просторі двох зміщуваних у зв'язку з геологічними рухами пагорбів-осциляторів, які або починають зближуватися, або віддалятися один від одного. Новий малюнок (праворуч) створює нові планові контури руху поверхневих та ґрунтових вод, змінює швидкість їх руху, хімічні формули електроліту та інші особливості, змушуючи зникнути одні види зелених насаджень та прийти їм на зміну іншим

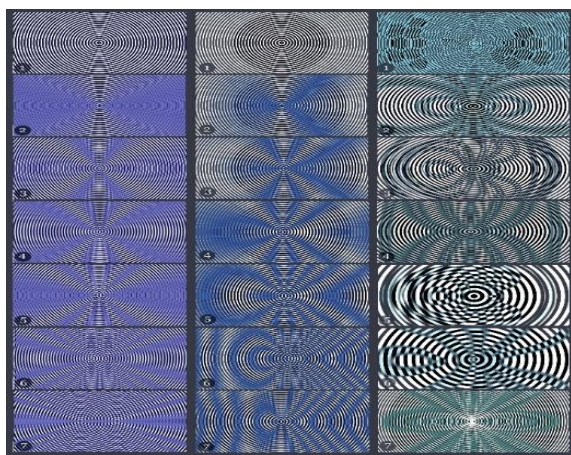


Рис. 24. Типологія інтерференційних явищ електромагнітної природи, що народжуються системами осциляторів на рельєфі місцевості, – важливий фактор лісорослинних умов, що поступово змінюється за впливу астропланетарних умов, і, відповідно, що змінює структуру зелених насаджень території



Рис. 25. Приклад інтерференційної матриці від системи осциляторів у південній частині приміської зони м. Дніпро (З розробок авторів статті)

Над кожним морфологічним типом осцилятора у вигляді опуклої форми рельєфу, спираючись на принципи осування та на морфологічний малюнок випромінювань у просторі, на основі принципу антенувального проектування, (принципу багатовимірного осірування в архітектурі та містобудуванні – термін та методика – В. В. В., Ш. О. С.) можна розробити як систему озеленення, так і руркомплєкси, що доповнюють цю систему, деякі з прикладів яких наводяться нижче (рис. 26–30).

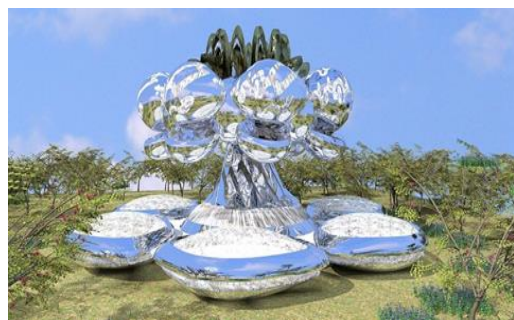




Рис. 26–30. Приклади рішення руроб'єктів, пов'язаних із формуванням системи озеленення територій міста, створені на основі принципів антенувального проектування (розробки виконані під керівництвом В. В. Воробйова у період з 2010 по 2020 р.). Над темами також працювали: К. Демченко, Г. Покутня, А. Гуськова, А. Кутько, Є. Гнатюк

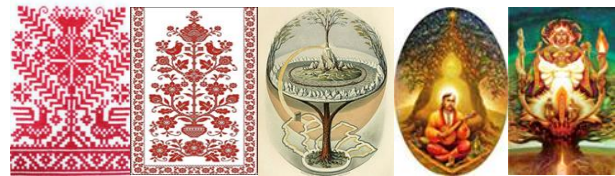
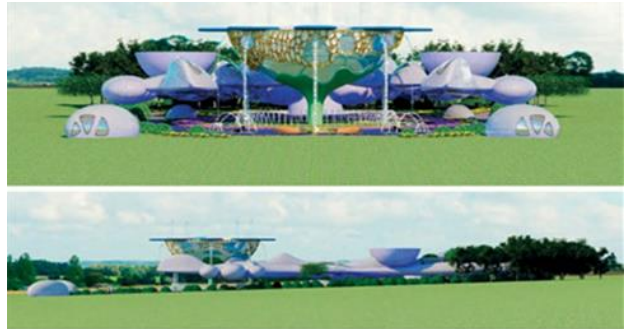


Рис. 31–42. Варіанти руркоттеджів. Архітектори: В. В. Воробйов (кер.), А. Хрістенко, 2021 р. Стародавні варіанти Древа Світів, закони багатомірних взаємодій, просторів, які використані в запропонованих руркоттеджах

Дереву з такими можливостями виводяться за допомогою селекційних технологій. Структура оболонки, що формує внутрішньокронові приміщення, – на основі використання рослинних симбіозів, запрограмованих на певні ефекти формоутворення. Посилення жорсткості оболонки – за рахунок застосування сучасних наноматеріалів з пам'яттю форми. Залежно від завдань, для яких можуть створитися подібні населені дендрокомплекси, об'єкти доповнюються різними варіантами вбудованих аеропружних динамічних систем, що забезпечують кроні явище нульової «плавучості» у повітряному просторі. Тобто приміщення із живих дендроконструкцій із біотичною системою підвищення міцності, анулювання пожежної небезпеки, захистом від тепловтрат, не тиснуть масою на дерево та на ґрунт.



*Рис. 54–58. Приклади окремих етапів антенувального проектування екобудівель: промінь, створений пагорбом заданої геометрії, має тільки свою довжину хвилі і свої вимоги до геометрії форми проєктованого об'єкта, створюваного для цього пагорба. Промінь, образно кажучи, ніби досягується лише до свого варіанта неба, де домінує лише свій частотний діапазон випромінювань, з якими пагорб та будівля на ньому пов'язані резонансом
(З розробок В. В. Воробйова (кер.) та І. А. Мерилової, 2013)*

Довідка. До кінця XIX століття на території всіх країн Європи існувало явище, що нагадує систему сучасних вуличних знаків дорожнього руху для водіїв автомобілів. Тільки система ця стосувалася форм впливу динамічних процесів астропланетарного генезису на людей, рослини, будівлі та елементи генплану міста. І виглядала вона як система ліпних прикрас на фасадах будинків, колон, напівколон, арок і руста на стінах будинків.

Нині архітектори не знають справжнього значення цих знаків. Тим часом знання, про які розповідають архітектурні прикраси, гідні для розміщення в найсерйозніших книгах з архітектурної та містобудівної тематики (рис. 59–62).



Рис. 59–62. Деякі із сотень прикладів формоутворення декоративних знаків-генераторів енергоінформаційної взаємодії будівлі та її мешканців з електромагнітними матрицями місця у м. Дніпро. Включно із зеленими насадженнями міста

По суті, тут діє правило: будівлі ще немає, але вона вже є; будівлі вже немає, але вона, як і раніше, є. Конфігурації площ для розміщення зелених насаджень у фізичній реальності ще немає, але вони вже є в енергопольовому діапазоні.

Завдання архітектора – зробити невидиму форму збурення середовища видимою зором людини. Через форму озелених територій та будівель. На напрями прояву видимості вказували ліпні рослинні орнаменти на фасадах старовинних будинків.

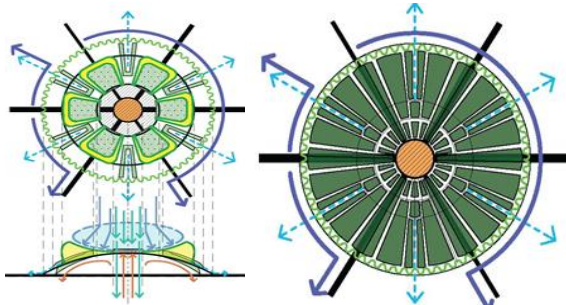
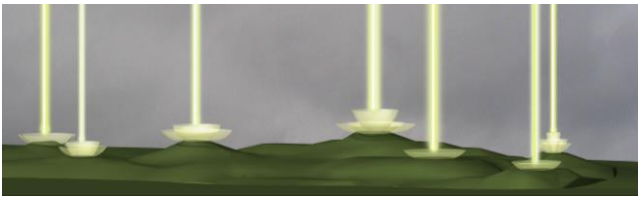


Рис. 63–65. Варіанти використання пагорба як антени-осцилятора для будівель, що розміщуються на ньому – випливають з абрисів поляризаційних процесів – процесів формування діаграм спрямованості випромінювань

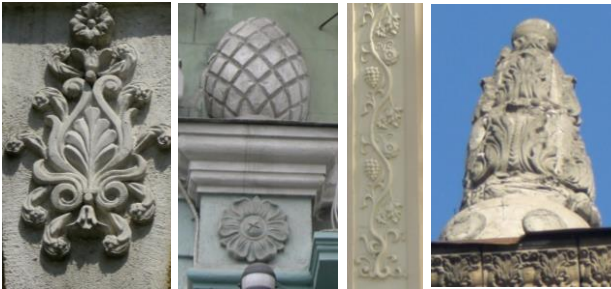


Рис. 66–69. Назви геометричних фігур на фасадах будинків м. Дніпро сягають своїм корінням у стародавню цивілізацію, які обмінювалися своїми знаннями: Палиця Діоніса; Лампа Осиріса; Дерево Світів (у тисячах морфологічних варіантів, частина з яких використовувалася навіть у першій половині XX ст.); Василіск; інші, інші. А також: у вигляді ваджероїдів, масконів, мандал, мандорл, меандр, фібул, рокальних матриць, лімніскат, інвольвент, право- та лівоспінювих свастик з різною кількістю променів, у вигляді рослинних орнаментів та інших форм. (Приклади – з м. Дніпро)

Цікаво відмітити світліну, на якій є шишкоподібний елемент над кутом будинку, розташованого на перетині проспекту Д. І. Яворницького та вулиці Січових стрільців в м. Дніпро. Будівлю зведено за проектом першого завідувача кафедри архітектурного проектування Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту О. Б. Петрова у 50-ті роки XX століття. Він був представником тієї плеяди старих архітекторів, частина з яких встигла прийняти знання про такі процеси від попередніх поколінь

архітекторів. Але не могла про них говорити відкрито, оскільки за часів СРСР існувала жорстка селекція інформації в науці.

Багато стародавніх знань у різних професіях були заборонені. Як і низка сучасних наук. І лише в приватних бесідах іноді молодші архітектори раптом відкривали для себе факт існування цих знань і факт того, що є й носії таких знань. В. В. Воробйову, одному з авторів цієї статті, пощастило: одного разу О. Б. Петров запросив його, тоді ще молодого асистента, який тільки почав працювати на кафедрі, до себе додому, до старовинного двоповерхового дореволюційного будинку на вулиці Бородинській. І після вражаючого, короткого, гротескного особистого погляду на те, як потрібно «читати каміння міста» (потім він це багато разів повторював своєму асистенту: **ВЧИТЬСЯ ЧИТАТИ КАМІННЯ МІСТА**) раптом почав розповідати, що існують зовсім інші знання в галузі архітектури, які зрідка він застосовує, не кажучи нікому, чому, але які поки що заборонені. Так вдалося дізнатися таємницю шишкоподібного елемента на вищезгаданій будівлі як елемента управління енергопотоками міста.

Залежно від ситуації в основі форми знаків закладалися енергогенераційні ефекти форми мандали, ваджри, мандорли, горизонтальних і вертикальних форм-атен найрізноманітніших типів – для блокування негативних випромінювань, для зміни довжини їх хвиль, для переміщення полів, для контргенерації, коли новостворений енергопотік нейтралізував зовнішні випромінювання, і багато-багато інших.

Фізика геометричної форми в цьому випадку використовувалася як одна з геніальних розробок людського інтелекту. Розміщені на фасадах будинків, вони створювали фактом своєї геометрії ту чи іншу версію збурення простору на різних відстанях від себе. Найчастіше – на десятки і більше метрів. Комбінування епюр збурень і було засобом керування невидимими енергопотоками у просторі міста.

Збурення нагадували форми різних квітів. Квітів Життя. Архітектори минулих

століть ніби «грали у квіти». Як маленька дитина складає з іграшкових кубиків якусь форму або малюнок, так наші попередники конструювали невидимі світи у фізичному просторі. Знаки розміщувалися над вікнами, під вікнами, на карнизах будинків, на вхідних козирках, на полотнах дверей, на замкових каменях дверних та віконних отворів, над кутами будівель, на кованих воротах аркових в'їздів у двори будинків, на вертикальних міжвіконних «рушниках», на парапетних кованих ґратах, на ґратах балконів, а також в інших місцях, пов'язаних з епюрами енергоінформаційних полів, народжених формами будівель.

У тому числі – як рослини, які використовуються у міському середовищі. Настав час відродити ці знання, поклавши їх на «нотний стан» сучасної науки та дослідити їх зміни для застосування у найближчому майбутньому.

Існує вплив змін інших факторів.

Все вищесказане вимагає перейти на нові уявлення, які будуть базовими елементами підходів до Концепції перетворення системи озеленених територій м. Дніпро в умовах подальшої трансформації екзогенних, ендемогенних та антропогенних факторів сталого розвитку.

Необхідні переходи:

– на нові показники антропогенного навантаження (ос./га) на озеленені території у дворах багатоповерхової забудови та котеджної забудови; у парках; на схилах балок; на прибережних територіях; на річкових островах;

– на нові показники відстаней між деревами та чагарниками на схилах із різною експозицією зі сторін світу;

– на нові схеми поєднання рослин в архітектурно-ландшафтних композиціях на основі використання зелених насаджень;

– на врахування підвищення активності електромагнітного спектра схилових поверхонь рельєфу міста – довжина хвилі електромагнітного спектра, що генерується схилом конкретної експозиції (північної, південної, східної або західної) істотно відрізняється від довжини хвилі, що генерується спектром іншої експозиції, і

визначає адекватний підхід як до геометричних абрисів і споруд, так і до підбору породного складу дерев; кожна порода дерева або чагарнику функціонує лише у своєму строго заданому діапазоні хвиль або електромагнітного спектра, або у своїх градієнтах гравітаційного поля; дерево, що висаджується не в свої умови, довго не зростатиме, і почне негативно впливати на інших учасників біоти;

– на нові норми застосування рослин у кожній з функціональних зон міста, а також на площах та вздовж вулиць (у тому числі з позиції створення комфортної затіненості);

– на нові архітектурно-ландшафтні прийоми формування панорам міста та його глибинних архітектурно-містобудівних композицій;

– на використання у місті спеціальних систем озеленення: прибудованих до торців багатоповерхових житлових будинків вертикальних багатоповерхових рекреаційних садів; інтеграції агроелемента до селитебної структури міста шляхом створення над багатоповерховими житловими будинками та в котеджній забудові багатофункціональних вертикальних, похилих та горизонтальних агроферм-автоматів, що повністю забезпечують овочами та іншою рослинною продукцією мешканців конкретного будинку; шляхом використання руркотеджів; створенням міжповерхових садів у багатоповерховій житловій забудові, а також садів на дахах; за допомогою суцільного озеленення фасадів; іншими інноваційними методами, включаючи розроблення таких планувальних багатоповерхових житлових будинків, у яких кожна квартира мала б окрему зелену кімнату, кожен поверх – малий садок для загального користування;

– на відродження в м. Дніпро колишнього досвіду використання помології – науки про виведення рослин під конкретні вимоги замовника або інші вимоги (з будівництвом нового помологічного центру (помологічного розсадника); колишній центр ХІХ – початку ХХ століття, що розташовувався на цій території, мав

всесвітню популярність та постачав фруктів, ягідні та інші рослини в королівські двори Європи) (рис. 70).

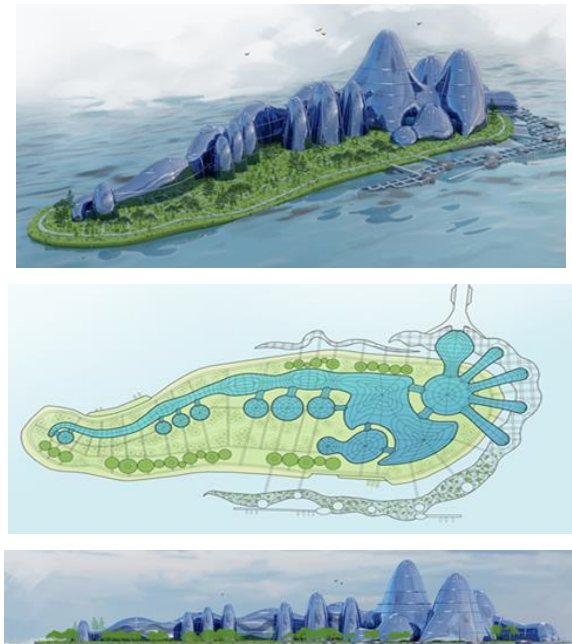


Рис. 70. Концептуальний проект сучасного помологічного розсадника на одному з островів р. Дніпро. Архітектори: В. Воробйов (кер.) та А. Архіпов 2023 р.

2. Зростання мікросейсміки регіонів, активізація неотектонічних процесів, що спричиняють підйом одних ділянок території міста та опускання інших, суттєво змінює розуміння підходів до озеленення міста, особливо з урахуванням циклів та ритмів геофізичної активності планети, циклів та ритмів вібрації води у Дніпровському водосховищі (до 28 мікроземлетрусів на добу).

Неотектоніка викликає появу нових матриць ущільнення ґрунтів або їх розущільнення, що зумовлює зміни адаптивних можливостей дерев, чагарників та трав, зміни їх породного складу та зміни всіх наслідків для організації озеленення міста. На ділянках, що піднімаються, зростають планограми розвитку зсувних і просадних явищ у ґрунтах і змушують розробляти такі підходи до використання насаджень, які забезпечують дренажний ефект, кореневе біоармування ґрунтів, фашинний ефект на поверхні схилів, а також швидкісний транзит поверхневих вод там,

де в його інфільтрації в ґрунт немає необхідності.

У місцях опускання ґрунтів (наприклад, на житловому масиві «Сонячний» у м. Дніпро відбувається виклинювання підпору ґрунтових вод, до їх наближення до денної поверхні ґрунту, а в подальшому – до виходу води на поверхню, у зв'язку з чим «Сонячний» потрібно буде перетворювати на польдер, створюючи відповідні інженерно-технічні споруди, і радикально змінюючи всю систему озеленення, оскільки у більшості порід сучасних дерев станеться гниття корневих систем від надлишку ґрунтової води і вони загинуть;

3. Зміна впливу астропланетарних проєкцій на рослинний склад регіону; астропланетарні проєкції на поверхню Землі, на кожен її точку – явище багатоаспектне та різне за характером впливу на рослини, на людей, на будівлі, на сітки вулиць міста. Астропланетарні проєкції створюють на земній кулі зони, пояси, ґратчасті структури з параметричними контурами осередків різної конфігурації.

Повний перелік астропланетарних проєкцій орбітальних малюнків планет та інших космічних тіл дуже великий. Ця тема також потребує окремого спеціального розгляду. Морфологічні малюнки проєкцій – фактично – СИЛОВИХ СМУГ І ТОЧОК ВПЛИВУ СИЛ, СТВОРЮВАНИХ ВЗАЄМОДІЄЮ ЗЕМЛІ З КОСМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ, поступово змінюються.

Вони, як магніти, «тягнуть» у себе зміщення «плям» поширення зелених насаджень. Малюнки проєкцій найчастіше утворюють на земній поверхні «розетки» (свого роду «квіти») геохімічних та геофізичних аномалій з різними типами електромагнітного та іншого впливу на людей та інші форми живих організмів.

В історії містобудування облік таких «розеток» відомий тисячі років. Один із яскравих періодів їх використання – епоха західноєвропейського Ренесансу. Всі генеральні плани міст на той час «малювалися» як та чи інша «розетка», що нагадує квітку. Насамперед, орбітальних

танців тих чи інших планет із Сонцем та Землею. В основі генеральних планів ідеальних міст епохи Відродження – малюнки тих чи інших орбітальних танців. Наприклад, танцю Землі та Венери. Або інші (рис. 71–85).

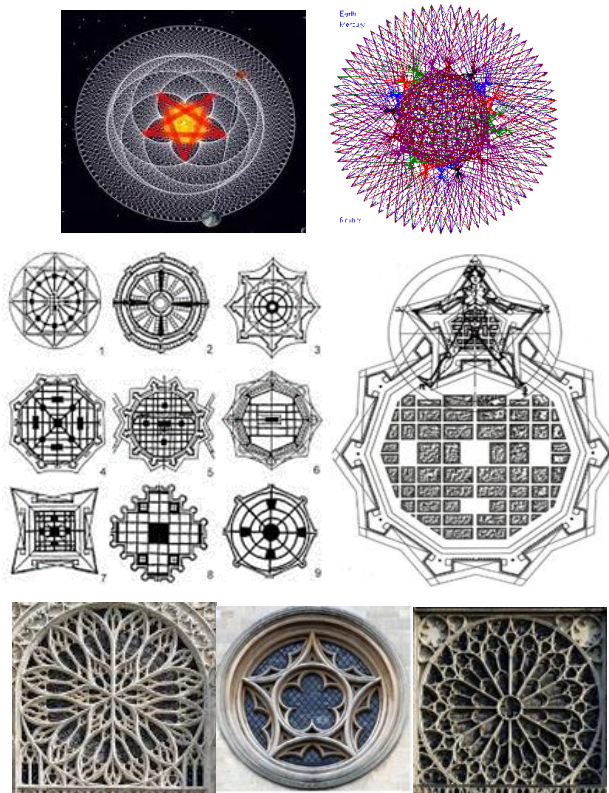


Рис. 71–85. Малюнок орбітального танцю Венери та Землі, використаний не тільки як геометрія генплану одного з ідеальних міст Ренесансу, а і як державний символ цілого ряду сучасних країн Світу: США, Китаю, Північної Кореї, Сенегалу, Сирії, Туреччини, Куби, В'єтнаму, Камеруну, Гани, Ліберії, Марокко, Того, ін. Малюнки танців інших планет також використовувалися у плануванні міст.

Причина використання відома: цикл енергетики танцю керує та розвиває інтелект людини. Цикл танцю впливає і на всі види рослинного життя планети Земля. Процес управління умами людей був відображений і в малюнках розеток-мандал, або, інакше, інструкціях для застосування на фасадах готичних соборів.

Продовження наслідків прецесії Земної осі – один із важливих процесів, вплив якого потрібно враховувати у формуванні системи озеленених територій міста; прецесія земної осі поступово викликає зміни зірок, які у ролі Полярних; швидкість прецесії – 1 градус за 72 роки; стародавні міста та їх

системи озеленення було створено в періоди, коли на північ вказувала не Полярна зірка, а інші, звані в астрономії «полярисимами півночі»; орієнтація була іншою; вона не відповідає сучасному положенню географічного хреста «північ – південь; захід – схід».

У цьому факторі зміщення земної осі навіть на одну соту градуса викликає помітну перебудову всіх екосистем, змінює геометрію «плям» територій та їх породний склад із різним видом зелених насаджень. Таких і кілька великих зсувів земної осі протягом останніх 50 років було кілька; наприклад, у зв'язку з ударом великого метеорита, що спричинив величезну цунамі (о. Пхукет); або зміщення осі Землі, викликане створенням великої кількості найбільших (у масштабі планети) водосховищ у Китаї; а також інші глобальні процеси та явища;

4. Загальний підйом частотного діапазону функціонування планети Земля у зв'язку з переходом у 2012 році галактичного екватора (галактична конвергенція); посилення показників космічної радіації, що надходить на поверхню Землі та викликає мутації, які або призводять до смерті, або викликають нові форми життя у багатьох живих організмів; активізація під містами явища так званого чорного шуму, що руйнує живі організми; чорний шум міститься в самому низу спектра, нижче блакитного, рожевого та коричневого шуму.

Чорний шум називають частотою Саймона та Гарфанкеля, або звуком тиші. Чорний шум помітно впливає на поширення породного складу дерев, чагарників і трав. Спектральна щільність чорного шуму приблизно дорівнює нулю на кожній частоті, тобто, образно кажучи, в різних місцях міста вона різна. Зв'язок рослин із довжиною хвилі електромагнітного спектра в принципі був відомий тисячі років тому, але під іншим тезаурусом. Наприклад, у вигляді знань про ті чи інші лікувальні та інші властивості рослин.

Що стосується космічної радіації: її зростання пов'язане з входженням Сонячної

системи в новий сектор галактичного простору, так звану радіаційну хмару. Вона матиме великі розміри навіть за космічними мірками. І вже почала викликати зміни ДНК у людей і тварин, а також впливати на рефлексії рослинних форм життя, на їх вибірковість щодо лісорослинних умов, що знову формуються. Розкривши поширення змін лише на рівні міста, можна розробити картограму їх обліку з організацією озелених територій міста.

5. Зміни просторового малюнка зон впливу існуючої забудови як об'єктів – імплантантів, що генерують власні енергоінформаційні «поля форми» та деформують енергоінформаційні «поля форм» рельєфу та озеленення територій. Облік нових чинників спричинює принципово інші, ніж раніше, явища в архітектурному формоутворенні (рис. 86–89).

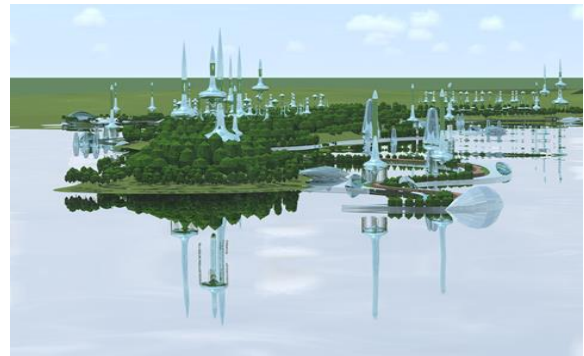


Рис. 86–89. Приклади формоутворення рурбудівель у складі озеленої території м. Дніпро, виконані в 2010–2021 рр. Над темою працювали: В. Бас та О. Радіонова (кер. – ст. викл. О. С. Шило); О. Жак та С. Палін (кер. – доц. В. В. Воробйов)

Висновок

Зміна екзогенних, ендегенних та антропогенних факторів, які визначають підходи до подальшого перетворення системи озелених територій міста Дніпро, вимагатимуть нових досліджень, у складі яких – натурні дослідження, комп'ютерні та лабораторні стадії моделювання аналізованих факторів та процесів у контексті їх впливу на прийняття рішення щодо остаточної версії концепції перетворення системи озелених територій міста Дніпро на сучасному етапі його екологізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крижановська Н. Я., Вотінов М. А., Смірнова О. В. Основи ландшафтної архітектури та дизайну : підруч. Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. 348 с.
2. Актуальні проблеми озеленення населених міст: освіта, наука, виробництво, мистецтво формування ландшафту : Матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. (До 10-річчя відкриття напрямку підготовки «Лісове та садово-паркове господарство»), 25–26 травня 2017 року. Біла Церква, 2017. 180 с.
3. Кучерявий В. П., Кучерявий В. С. Озеленення населених місць : підруч. для студ. вищ. навч. закл. Львів : «Новий Світ-2000», 2020. 666 с.
4. Перспективи розвитку лісового та садово-паркового господарства : матер. Всеукр. наук.-практ. конф. (14 грудня 2016 року); відп. ред. О. О. Непочатенко. Умань : ВПЦ «Візаві», 2016. 182 с.

5. Рослини та урбанізація : матер. восьмої Міжнар. наук.-практ. конф. «Рослини та урбанізація» (Дніпро, 5 березня 2019 р.). Дніпро, 2019. 153 с.

6. Ліси та урбоєкосистеми України в умовах війни : стан, збереження та відновлення : тези доп. учасників Міжнар. наук.-практ. конф. (18 листопада 2022). Київ : ТОВ «ЦП «КОМПРИНТ», 2022. 98 с.

7. Черносова Т. О. Міське зелене будівництво : конспект лекцій для студентів денної, заочної, прискореної форм навчання, слухачів другої вищої освіти спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія фахового спрямування «Міське будівництво та господарство». Харків. нац. унт міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2018. 68 с.

REFERENCES

1. Kryzhanovskaia N.Ya., Votinov M.A. and Smirnova O.V. *Osnovy landshaftnoi arkhitektury ta dyzainu: pidruchnyk* [Fundamentals of Landscape Architecture and Design: a textbook]. Kharkiv : O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2019, 348 p. (in Ukrainian).

2. *Aktualni problemy ozelenennia naselenykh mist: osvita, nauka, vyrobnytstvo, mystetstvo formuvannia landshaftu : Materialy III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Do 10-richchia vidkryttia napriamu pidhotovky "Lisove ta sadovo-parkove hospodarstvo")* [Green City Challenges: Education, Research, Manufacturing, Art of Landscape Design : Proceedings of the III International sc. and pract. conf. (To the 10th anniversary of the Training Programme in Forestry and Park Gardening)]. Bila Tserkva, May 25–26, 2017, 180 p. (in Ukrainian).

3. Kucheriavyi V.P. and Kucheriavyi V.S. *Ozelenennia naselenykh mist : pidruchnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv* [Urban Greening : a textbook for students of higher education institutions]. Lviv : "Novyi Svit-2000", 2020, 666 p. (in Ukrainian).

4. *Perspektyvy rozvytku lisovoho ta sadovo-parkovoho hospodarstva : mater. vseukr. nauk.-prakt. konf.* [Prospects for the development of forestry and landscape gardening : the materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference]. December 14, 2016 edited by O.O. Nepochatenko, Uman': "Vizavi" Publ., 2016, 182 p. (in Ukrainian).

5. *Roslyny ta urbanizatsiia : materialy vosmoi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Roslyny ta urbanizatsiia"* [Plants and Urbanisation: Proceedings of the Eighth International Scientific and Practical Conference "Plants and Urbanisation"]. March 5, Dnipro, 2019, 153 p. (in Ukrainian).

6. *Lisy ta urboekosystemy Ukrainy v umovakh viiny: stan, zberezhennia ta vidnovlennia : tezy dopovidei uchasnykiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* [Forests and Urban Ecosystems of Ukraine in the Context of War : Status, Conservation and Restoration : Book of Abstracts of the International sc. and pract. conf]. Kyiv : COMPRINT LLC, 2022, 98 p. (in Ukrainian).

7. Chernosova T.O. *Miske zelene budivnytstvo : konspekt lektsii dlia studentiv dennoi, zaochnoi, pryskorenoi form navchannia, slukhachiv druhoi vyshchoi osvity spetsialnosti 192 – Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia fakhovoho spriamuvannia "Miske budivnytstvo ta hospodarstvo"* [Urban green construction: lecture notes for university students of all modes of study in Civil Engineering : Urban Construction and Management]. Kharkiv : O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2018, 68 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.03.2024.

УДК 69.059.7:658.2

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.102.1063

УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО РЕДЕВЕЛОПМЕНТУ ПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ

КОВАЛЬОВ В. В.¹, *докт. техн. наук, доц.*,
КРАВЧУНОВСЬКА Т. С.^{2*}, *докт. техн. наук, проф.*,
БРОНЕВИЦЬКИЙ А. П.³, *канд. техн. наук*,
ЗАЯЦЬ Є. І.⁴, *докт. техн. наук, проф.*,
ДАНИЛОВА Т. В.⁵, *канд. техн. наук, доц.*,
КОСОЛАПОВ А. Ф.⁶, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 906-86-42, e-mail: kovvyach12@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

^{2*} Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: kts789d@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0986-8995

³ Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: andbron_gm@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9656-6085

⁴ Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7382-919X

⁵ Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: danylova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9319-0154

⁶ Кафедра геодезії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-07-69, e-mail: sgm@sgm.org.ua, ORCID ID: 0000-0001-8931-0352

Анотація. Постановка проблеми. Через фінансово-економічну кризу багато промислових підприємств припинили свою діяльність або суттєво зменшили обсяги виробництва внаслідок скорочення ринків збуту продукції, що супроводжується деструктивними процесами та явищами. Адже в умовах динамічного конкурентного середовища частина підприємств мають застарілі та зношені основні виробничі фонди, їх продукція не користується попитом, приміщення здаються в оренду, значні території зайняті відходами і шкідливими речовинами (екологічно небезпечними), низький технологічний рівень виробництва, слабку науково-технічну сферу, скорочення пропозицій трудових ресурсів. Тому забезпечення сталого розвитку України неможливе без вирішення проблем реструктуризації та якісного оновлення промислового виробництва, реконструкції деградованих міських територій, зайнятих занедбаними будівлями і спорудами промислових підприємств. Отже, існує об'єктивна потреба підвищення рівня рентабельності забудови територій шляхом обґрунтування альтернативних варіантів використання земельних ділянок: знесення деградованих промислових підприємств та будівництво нових об'єктів або реконструкція будівель і споруд промислових підприємств зі зміною функціонального призначення. Проте наразі відсутній єдиний підхід до побудови інформаційної моделі процесу прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення. **Мета статті** – розроблення вдосконаленого алгоритму прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення. **Висновок.** Удосконалено алгоритм прийняття рішень з реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення, що забезпечує одержання обґрунтованих значень техніко-економічних показників таких проєктів залежно від наявної вихідної інформації щодо об'єкта та умов виконання робіт, а також надає можливість уточнення значень показників ефективності управлінських рішень на різних етапах життєвого циклу, завдяки коригуванню значень тривалості та вартості реконструкції шляхом варіювання параметрів, які входять до складу визначальних факторів.

Ключові слова: прийняття рішення; алгоритм; блок-схема; реконструкція; сталий розвиток; раціоналізація

IMPROVED DECISION-MAKING ALGORITHM FOR THE REDEVELOPMENT OF INDUSTRIAL AREAS

KOVALOV V.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KRAVCHUNOVSKA T.S.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BRONEVYTSKYI A.P.³, *Cand. Sc. (Tech.)*,
ZAIATS Ye.I.⁴, *Dr. Sc. (Tech.), Ass.-Prof.*,
DANYLOVA T.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOSOLAPOV A.F.⁶, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (068) 906-86-42, e-mail: kovvyach12@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

^{2*} Department of Organisation and Management in Construction, 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: kts789d@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0986-8995

³ Department of Organisation and Management in Construction, 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: andbron.gm@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9656-6085

⁴ Department of Organisation and Management in Construction, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7382-919X

⁵ Department of Organisation and Management in Construction, 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: danylova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9319-0154

⁶ Department of Geodesy, National Technical University "Dnipro University of Technology", 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 373-07-69, e-mail: sgm@sgm.org.ua, ORCID ID: 0000-0001-8931-0352

Abstract. Raising of problem. As a result of the financial and economic crisis, many industrial enterprises have ceased operations or significantly reduced production volumes due to the shrinking markets for their products, which is accompanied by destructive processes and phenomena. In a dynamic competitive environment, some enterprises have outdated and worn-out fixed assets, their products are not in demand, their premises are leased, large areas are covered with waste and harmful substances that are environmentally hazardous, low technological level of production, weak scientific and technical sphere, and reduced supply of labour resources. Therefore, ensuring sustainable development of Ukraine is impossible without solving the problems of restructuring and qualitative renewal of industrial production, reconstruction of degraded urban areas occupied by abandoned buildings and structures of industrial enterprises. Thus, there is an objective need to increase the level of profitability of land development by justifying alternative land use options: demolition of degraded industrial enterprises and construction of new facilities or reconstruction of industrial buildings and structures with a change of functional purpose. However, there is currently no unified approach to building an information model of the decision-making process for the reconstruction of industrial enterprises with a change in their functional purpose. Translated with DeepL.com (free version). **Purpose of the article.** To develop an improved decision-making algorithm for the reconstruction of mining enterprises with a change in functional purpose. **Conclusion.** The decision-making algorithm for the reconstruction of industrial enterprises with a change in functional purpose, which ensures the receipt of substantiated values of technical and economic indicators of such projects, depending on the available initial information about the object and the conditions of production of works, and also provides the possibility of specifying the values indicators of the effectiveness of managerial decisions at different stages of the life cycle, thanks to the adjustment of the values of the duration and cost of reconstruction by varying the parameters that are part of the determining factors.

Keywords: *decision-making; algorithm; block diagram; reconstruction; sustainable development; rationalisation*

Постановка проблеми. Сучасна концепція сталого розвитку [1; 2] передбачає збалансований розвиток суспільства на основі раціонального використання обмежених природних ресурсів та застосування природо-, енерго- і матеріалозберігальних технологій.

Наразі один із чинників, який ускладнює сталий розвиток, – це функціонування промислових підприємств, розташованих у межах міст, зокрема, гірничих підприємств [3]. Із позиції поліпшення екологічного стану довкілля, відтворення природноресурсного

потенціалу міст доцільно перебазувати, перепрофілювати або ліквідувати такі підприємства. Адже кількість вільних територій, придатних для подальшого розвитку міст, нині вкрай обмежена. Разом із тим значна частина територій майже всіх функціональних зон використовується неефективно.

Також потрібно зважати на той факт, що через фінансово-економічну кризу багато промислових підприємств припинили свою діяльність або суттєво зменшили обсяги виробництва внаслідок скорочення ринків збуту продукції, що супроводжується деструктивними процесами та явищами [4; 5]. Адже в умовах динамічного конкурентного середовища частина підприємств мають застарілі та зношені основні виробничі фонди, їх продукція не користується попитом, приміщення здаються в оренду, значні території зайняті відходами і шкідливими речовинами (екологічно небезпечними), низький технологічний рівень виробництва, слабку науково-технічну сферу, скорочення пропозицій трудових ресурсів.

Тому забезпечення сталого розвитку України неможливе без вирішення проблем реструктуризації та якісного оновлення промислового виробництва, реконструкції деградованих міських територій, зайнятих занедбанними будівлями і спорудами промислових підприємств.

Отож, існує об'єктивна потреба підвищення рівня рентабельності забудови територій шляхом обґрунтування альтернативних варіантів використання земельних ділянок: знесення деградованих промислових підприємств та будівництво нових об'єктів або реконструкція будівель і споруд промислових підприємств зі зміною функціонального призначення [6; 7].

Проте наразі відсутній єдиний підхід до побудови інформаційної моделі процесу прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення.

Аналіз публікацій. Прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального

призначення з урахуванням критеріїв сталого розвитку має враховувати задані ресурсні обмеження з одночасним дотриманням вимог до безпечності, екологічності, якості та енергоефективності об'єктів [8; 9].

Особливостям проектування підприємств присвячено працю [10]. Розглянуто можливі ризики під час освоєння підземного простору в період будівництва, реконструкції або експлуатації виробництва, розроблено класифікацію ризиків, запропоновано стратегію керування ризиками, спрямовану на досягнення екологічної, технологічної й експлуатаційної безпеки під час освоєння підземного простору з максимальним економічним ефектом. Проте автори не досліджували питання ревіталізації будівель і споруд гірничих підприємств після припинення їх функціонування.

Новий погляд на процес прийняття рішень щодо управління експлуатацією підприємств, заснованого на принципах сталого розвитку, подано в дослідженні [11], проте в роботі немає відповіді на питання про перспективи існування таких об'єктів на етапі припинення їх діяльності.

Дослідження, висвітлені у статтях [12; 13], присвячені теорії та практиці використання техногенних територій для потреб міського розвитку, однак поза увагою авторів залишились специфічні процеси реконструкції саме гірничих підприємств зі зміною функціонального призначення, виконувані на засадах сталого розвитку.

Дослідження [14; 15] присвячені теорії та практиці сталого проектування, проте автори не охопили такий етап життєвого циклу об'єктів як експлуатація.

Праці [16; 17] присвячені розробленню прикладного інструментарію організації біосферосумісного будівництва, реалізованого на засадах екологічності та енергоефективності. Але в них об'єктом дослідження стали спортивно-оздоровчі комплекси, які не враховують специфічні характеристики гірничих підприємств та особливості технології їх реконструкції.

Тому цей підхід потребує подальшого вдосконалення.

У працях [18; 19] викладено технології прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах в умовах ризику і невизначеності, але не розглядається застосування методів оптимізації.

Публікація [20] присвячена аналітичному огляду робіт із питань вибору раціональних рішень із застосуванням багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано створення інтегрованої системи прийняття рішень, яка поєднує переваги як ВІМ-технологій, так і предметно-орієнтованого проектування. Разом із цим залишається невирішеним питання взаємозв'язку між різними критеріями у разі збільшення кількості критеріїв, встановлення ієрархії критеріїв. Проте видається можливим поширення запропонованого підходу і на дослідження з прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення.

На сьогодні завдання прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення не автоматизоване на достатньому рівні. Тому рішення приймаються на основі суб'єктивних оцінок осіб, які їх ухвалюють, або із застосуванням недостатньо повних інформаційних моделей.

Мета та постановка завдань. Мета дослідження – розроблення вдосконаленого алгоритму прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення.

Це потребує формалізації множини способів реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення, а також формалізації вибору найраціональнішого варіанта такої реконструкції.

Результати досліджень. Процес прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення передбачає формування множини всіх можливих рішень, їх оцінювання та аналіз. При цьому

для вибору рішення можна застосувати принцип раціоналізації. Застосування цього принципу з порівнянням альтернативних варіантів і вибором найбільш раціонального з них означає дотримання вимог щодо безпечності, екологічності, якості та енергоефективності об'єктів і врахування заданих ресурсних обмежень.

Також для досягнення поставленої мети автори створили поповнювану інформаційну базу даних про реконструкцію підприємств, яка стала основою для розроблення вдосконаленого алгоритму прийняття раціональних рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення.

Проект реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення розглянемо як відкриту складну систему, що існує у взаємодії з зовнішнім середовищем, змінюючи його властивості. Тому прийняття рішень про реконструкцію промислових підприємств зі зміною функціонального призначення засноване на оцінюванні умов реконструкції, врахуванні системного впливу визначальних факторів, стохастичного характеру такого впливу, а також можливості коригування ухвалюваних рішень з метою забезпечення заданих ресурсних обмежень.

Завдання формалізації множини способів реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення полягає в такому. Проект реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення розглядається як процес цілеспрямованих змін промислової території з певним набором наявних об'єктів протягом певного проміжку часу.

Отже, промисловий район, який розглядається як об'єкт реконструкції, можна охарактеризувати так:

- наявність території, на якій розміщені промислові будівлі, інженерні споруди та мережі;

- незадовільний рівень ефективності використання території та існуючих

об'єктів, невиконання вихідних функцій, погіршення технічного стану об'єктів;

– невідповідність як забудови, так і окремих об'єктів сучасним вимогам щодо економічності, енергоефективності, якості, безпечності, екологічності, ефективної експлуатації.

Таким чином, у межах міста розташована певна кількість земельних ділянок, зайнятих промисловою забудовою:

$$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, \dots, t_m\} = \{t_i\},$$

де t_i – i -та земельна ділянка у межах міста, зайнята промисловою забудовою; при цьому $i = \overline{1, m}$.

Кожна з таких земельних ділянок може бути описана множиною певних характеристик (властивостей):

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_j, \dots, s_n\} = \{s_j\},$$

де s_j – кількість груп характеристик земельної ділянки, зайнятої промисловою забудовою, при цьому $j = \overline{1, n}$.

Зокрема, як такі групи характеристик земельної ділянки, зайнятої промисловою забудовою, доцільно розглядати:

- містобудівні характеристики;
- територіально-планувальні характеристики;
- правові характеристики (право користування, володіння, розпорядження ділянкою, сервітути);
- наявність прилеглої житлової та громадської забудови;
- стисненість території;
- наявність інженерних споруд і мереж та умови їх експлуатації;
- інженерно-геологічні характеристики;
- санітарно-гігієнічні характеристики (санітарно-захисна зона, водоохоронна зона, зона обмеження забудови за ступенем забруднення атмосферного повітря, зона обмеження забудови за рівнем напруження електромагнітного поля, зона перевищення припустимого рівня шуму, ореол забруднення ґрунтів);

– забезпеченість інженерною інфраструктурою (покриття вулиць, централізоване водопостачання, каналізація, централізоване газопостачання, тепlopостачання).

Виходячи з цих характеристик, визначаються вимоги до поверховості будівель, які підлягають реконструкції, до інсоляції, аерації та шумозахисту, до благоустрою та озеленення території, щодо екологічної безпеки довкілля.

Також, беручи до уваги характеристики території та прилеглої забудови, на основі аналізу ринкової кон'юнктури, вартості продажу та вартості оренди нерухомості визначається майбутня функція об'єкта. При цьому необхідно також урахувати ризики, притаманні інвестиційному проекту.

На земельній ділянці з промисловою забудовою розташована певна сукупність промислових будівель, які потребують реконструкції зі зміною функціонального призначення.

Позначимо через P множини розташованих на ділянці промислових будівель, які підлягають реконструкції зі зміною функціонального призначення.

Впорядкуємо всі будівлі з множини P та позначимо їх як p_1, p_2, \dots, p_r . Тоді множина P матиме такий вигляд:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_u, \dots, p_r\} = \{p_u\},$$

де p_u – u -та промислова будівля, розташована у заданих межах промислової території, що розглядається, яка потребує реконструкції зі зміною функціонального призначення; при цьому $u = \overline{1, r}$.

Кожна промислова будівля, розташована у заданих межах промислової території, що розглядається, яка потребує реконструкції зі зміною функціонального призначення, володіє певними характеристиками:

$$Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_k, \dots, z_p\} = \{z_k\},$$

де z_k – кількість груп характеристик промислової будівлі, при цьому $k = \overline{1, p}$.

Як групи характеристик промислової будівлі розглядаються:

- архітектурні рішення (відомості про рік будівництва, виконувані ремонти та реконструктивні заходи протягом періоду експлуатації, цінність фасадів);

- об'ємно-планувальні рішення (дані про поверховість, будівельний об'єм і загальну площу, капітальність);

- конструктивні рішення;

- технічний стан конструкцій та будівлі в цілому (фізичний і моральний знос, інженерне забезпечення).

У процесі ініціації проєкту реконструкції промислових будівель зі зміною їх функціонального призначення, на основі виявлених груп характеристик промислової будівлі та виробничої території, необхідно визначити оптимальні функції об'єкта. Це завдання можливо формалізувати таким чином. Кожному елементу з множини P відповідає множина альтернативних варіантів функцій після реконструкції:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_b, \dots, a_g\} = \{a_b\},$$

де a_b – b -та функція об'єкта після реконструкції, при цьому $b = \overline{1, g}$.

Як можливі функції будівлі після реконструкції розглядаються:

- офісне призначення;
- торговельне призначення;
- житлове призначення;
- культурно-мистецьке призначення.

Різні функції можуть по-різному взаємодіяти з територією, з елементами транспортної, інженерної і соціальної інфраструктури та одна з одною з погляду збільшення витрат на реконструкцію, збитків довкіллю, ризиків тощо.

Оскільки промислові будівлі після реконструкції можуть використовуватись за різним функціональним призначенням, а кожному способу використання об'єкта відповідає певна величина його вартості, необхідно визначити той спосіб використання, який виглядає найкращим і найбільш ефективним. Отже, вибір найдоцільнішої функції об'єкта після реконструкції має ґрунтуватись на принципі найбільш ефективного використання, який полягає в такому використанні об'єкта, в

результаті якого ринкова вартість об'єкта буде максимальною.

Найбільш ефективне використання об'єкта визначається шляхом перевірки відповідності альтернативних варіантів використання таким критеріям, як:

- технічна можливість використання;
- юридична дозволеність використання;
- економічна доцільність використання.

Висновок про найбільш ефективне використання об'єкта приймається таким чином.

Найбільш ефективний варіант використання об'єкта з погляду технічної можливості обирається виходячи з його фізичних параметрів, конструктивних особливостей тощо.

Вибір найбільш ефективного варіанта використання об'єкта за критерієм юридичної дозволеності передбачає розгляд тих способів використання об'єкта, які дозволені законодавством України та розпорядженнями органів місцевого самоврядування, обмеженнями на приватну ініціативу, положеннями про історичні зони, планами розвитку міст і екологічним законодавством.

Визначення економічної доцільності під час вибору найбільш ефективного варіанта використання об'єкта передбачає розгляд того, яке технічно здійсненне та дозволене законодавством використання буде забезпечувати прийнятний дохід власнику за найменших капітальних вкладень та максимального терміну використання об'єкту.

Разом із цим, обґрунтовуючи найбільш ефективне використання промислової будівлі після реконструкції зі зміною функціонального призначення, необхідно також брати до уваги такі чинники як потенціал місця розташування об'єкта та ринковий попит.

Аналізуючи потенціал місця розташування промислової будівлі, потрібно зважати на тип землекористування який превалує у цьому районі, і доступність об'єкта. Також для аналізу місця розташування об'єкта потрібно врахувати

несумісні варіанти землекористування, різноманітні незручності та небезпеки.

Аналіз ринкового попиту виконується з метою оцінювання поєднуваності варіанта використання будівлі, що розглядається, з ринковою кон'юнктурою.

Аналіз потенціалу місця розташування промислової будівлі передбачає оцінювання:

- транспортної інфраструктури;
- інженерної інфраструктури;
- соціальної інфраструктури;
- благоустрою території;
- естетичної та ландшафтної цінності;
- інженерно-геологічних умов;
- складності виконання будівельних робіт.

За результатами аналізу технічного стану об'єктів, стисненості території об'єкта реконструкції, насиченості території промислового підприємства інженерними спорудами і мережами та умов їх експлуатації, а також з урахуванням обраної майбутньої функції визначається перелік необхідних ремонтних і реконструктивних заходів.

Відповідно позначимо через D множину всіх способів реконструкції, які можна застосувати до кожної промислової будівлі з множини P . Упорядкуємо ці способи реконструкції та позначимо їх як d_1, d_2, \dots, d_q .

Таким чином,

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_h, \dots, d_q\} = \{d_h\},$$

де $h = \overline{1, q}$.

Якщо для кожної промислової будівлі p_u із множини P можна визначити підмножину D_u з D , яка складається з допустимих для цієї промислової будівлі способів її реконструкції, тобто для об'єкта p_u допустимою підмножиною буде D_u , то для об'єкта p_1 допустимою підмножиною буде D_1 , для об'єкта p_2 допустимою підмножиною буде D_2 , і т. д., а для об'єкта p_r допустимою підмножиною буде D_r (множина D_u включається в множину D (

$D_u \subset D$), тобто всі елементи множини D_u є елементами множини D), при цьому:

$$q_u \leq q,$$

де q_u – кількість допустимих способів реконструкції промислової будівлі p_u .

Позначимо через d_u ($u = \overline{1, r}$) змінну, яка приймає свої значення з множини D_u . Тоді $(d_1, d_2, \dots, d_u, \dots, d_r)$ при кожному конкретному значенні змінних $d_1 \in D_1, d_2 \in D_2, \dots, d_u \in D_u, \dots, d_r \in D_r$ буде являти собою варіант реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення.

У свою чергу, позначимо через B множину інженерних споруд, розташованих у межах промислової території, яка розглядається з метою реконструкції.

Впорядкуємо інженерні споруди з множини B та позначимо їх як b_1, b_2, \dots, b_e .

Тоді множина інженерних споруд B матиме такий вигляд:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_l, \dots, b_e\} = \{b_l\},$$

де $l = \overline{1, e}$.

Позначимо через O множину всіх способів реконструкції інженерних споруд B . Упорядкуємо ці способи реконструкції інженерних споруд та позначимо їх як o_1, o_2, \dots, o_w .

Таким чином,

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_v, \dots, o_w\} = \{o_v\},$$

де $v = \overline{1, w}$.

Якщо для кожної інженерної споруди b_l із множини B можна визначити підмножину O_l з O , яка складається з допустимих для цієї інженерної споруди способів її реконструкції, тобто для об'єкта b_l допустимою підмножиною буде O_l , то для об'єкта b_1 допустимою підмножиною буде O_1 , для об'єкта b_2 допустимою підмножиною буде O_2 , і т. д., а для об'єкта b_e допустимою підмножиною буде O_e (при цьому множина O_e включається в множину O ($O_e \subset O$), тобто всі елементи множини O_e є елементами множини O), при цьому:

$$w_l \leq w,$$

де w_l – кількість допустимих способів реконструкції інженерної споруди b_l .

Якщо позначити через o_l ($e = \overline{1, k}$) змінну, яка приймає значення з множини o_l , то $(o_1, o_2, \dots, o_l, \dots, o_e)$ при кожному конкретному значенні змінних $o_1 \in O_1, o_2 \in O_2, \dots, o_l \in O_l, \dots, o_e \in O_e$ являтиме собою варіант реконструкції інженерних споруд.

Аналогічним чином формуємо множину інженерних мереж та відповідних способів їх реконструкції.

Позначимо як c множину інженерних мереж, що розташовані в межах промислової території, яка розглядається з метою реконструкції.

Впорядкуємо інженерні мережі з множини c та позначимо їх як c_1, c_2, \dots, c_x .

Отже, множина інженерних мереж c матиме такий вигляд:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_y, \dots, c_x\} = \{c_y\},$$

де $y = \overline{1, x}$.

Якщо позначити як F множину всіх способів реконструкції інженерних мереж c , упорядкувати ці способи реконструкції та позначити їх як $f_1, f_2, \dots, f_\alpha, \dots, f_\beta$, то:

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_\alpha, \dots, f_\beta\} = \{f_\beta\},$$

де $\alpha = \overline{1, \beta}$.

Якщо для інженерної мережі c_y із множини c можна сформувати підмножину F_y з F , яка складається з допустимих для цієї інженерної мережі способів її реконструкції, тобто для інженерної мережі c_y допустимою підмножиною буде F_y , то для інженерної мережі c_1 допустимою підмножиною буде F_1 , для інженерної мережі c_2 допустимою підмножиною буде F_2 , і т.д., а для інженерної мережі c_x допустимою підмножиною буде F_x (множина F_y включається в множину F ($F_y \subset F$), тобто всі елементи множини F_y є елементами множини F), при цьому:

$$\beta_y \leq \beta,$$

де β_y – кількість допустимих способів реконструкції інженерної мережі c_y .

Якщо позначити як f_y ($y = \overline{1, x}$) змінну, яка приймає свої значення з множини F_y , то $(f_1, f_2, \dots, f_y, \dots, f_x)$ при кожному конкретному значенні змінних $f_1 \in F_1, f_2 \in F_2, \dots, f_y \in F_y, \dots, f_x \in F_x$ являтиме собою варіант реконструкції інженерних мереж.

Тоді загальна кількість допустимих варіантів реконструкції (γ), виходячи з розташованих у межах промислової території r промислових будівель, e інженерних споруд та x інженерних мереж, дорівнюватиме добутку кількості допустимих способів реконструкції за кожним із цих об'єктів:

$$\gamma = \delta \cdot \varepsilon \cdot \lambda,$$

$$\delta = \prod_{u=1}^r q_u,$$

$$\varepsilon = \prod_{l=1}^e w_l,$$

$$\lambda = \prod_{y=1}^x \beta_y,$$

де δ – загальна кількість допустимих варіантів реконструкції промислових будівель, розташованих у межах промислової території; ε – загальна кількість допустимих варіантів реконструкції інженерних споруд, розташованих у межах промислової території; λ – загальна кількість допустимих варіантів реконструкції інженерних мереж, розташованих у межах промислової території.

Протягом життєвого циклу, після реконструкції, промислові будівлі мають задовольняти вимогам щодо енергоощадності, екологічної сумісності, якості і безпечності.

Таким чином, якщо позначити як E підмножину варіантів з γ , яка задовольняє вимогам енергоощадності ($E \subset \gamma$), позначити як K підмножину варіантів з γ , яка

задовольняє вимогам екологічної сумісності ($K \subset \gamma$), позначити як Q підмножину варіантів з γ , яка задовольняє вимогам якості ($Q \subset \gamma$), як R позначити підмножину варіантів з γ , яка задовольняє вимогам безпечності ($R \subset \gamma$), тоді їх перетин являтиме собою сукупність допустимих варіантів реконструкції, при яких одночасно дотримуються вимоги щодо енергоощадності, екологічної сумісності, якості та безпечності ($E \cap K \cap Q \cap R \subset \gamma$).

Як критерії порівняння альтернативних допустимих варіантів реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення і вибору найбільш раціонального з них, що характеризуватимуть якість прийнятого рішення та представлятимуть екстремальне значення цільової функції, пропонується розглядати мінімум тривалості і мінімум вартості реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення.

Це можна подати такою математичною моделлю:

$$\sum_{u=1}^r c(d'_u) + \sum_{l=1}^e c(o'_l) + \sum_{y=1}^x c(f'_y) \rightarrow \min ,$$

при цьому мають виконуватись умови:

$$d'_u \in E \cap K \cap Q \cap R ,$$

$$o'_l \in E \cap K \cap Q \cap R ,$$

$$f'_y \in E \cap K \cap Q \cap R ,$$

$$\delta \geq \delta_{\min} ,$$

де $c(d'_u)$ – вартість реконструкції промислової будівлі p_u допустимим способом d'_u , грн; $c(o'_l)$ – вартість реконструкції інженерної споруди b_l допустимим способом o'_l , грн; $c(f'_y)$ – вартість реконструкції інженерної мережі c_y допустимим способом f'_y , грн; δ – величина загальної площі будівлі, яка може бути отримана в результаті реконструкції, м²; δ_{\min} – мінімальне значення величини

загальної площі будівлі, яка має бути отримана в результаті реконструкції, м².

Задачу порівняння альтернативних варіантів рішень зі сформованої множини і вибору найраціональнішого з них можна алгоритмізувати завдяки застосуванню системного підходу та інформаційних технологій. Такий управлінський інструментарій у вигляді удосконаленого алгоритму прийняття рішень щодо реконструкції гірничих підприємств зі зміною функціонального призначення орієнтований, передусім, на потреби замовника, інвестора.

Запропонований нами вдосконалений алгоритм прийняття рішень щодо реконструкції гірничих підприємств зі зміною функціонального призначення у вигляді блок-схеми дозволяє вибрати прийнятний варіант подальшого функціонального використання колишніх промислових підприємств, які вже не експлуатуються, з урахуванням екологічного, економічного та соціального підходів у межах концепції сталого розвитку (рис. 1).

Це передбачає формування множини вихідних даних, множини вимог і обмежень щодо отримання та застосування очікуваного результату, з урахуванням існуючих ресурсних обмежень, вимог до безпечності, екологічності, якості та енергоефективності, прийнятного рівня ризику, умов стійкості схилів та стійкості будівель, розташованих на схилах.

Розроблений підхід дозволяє здійснювати коректування ухвалюваних рішень із дотриманням ресурсних обмежень на основі покрокового наближення до заданих умов. Покрокове коректування рішень виконується до моменту збалансування вимог замовника та можливостей виконавця робіт.

Перелік вихідних даних, необхідних для розроблення, оцінювання, аналізу і вибору раціональних рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення, наведено в таблиці 1.

Використовуючи вихідні дані,

систематизовані в таблиці 1, розраховують кількісні значення визначальних факторів (табл. 2).

Систематизовані в таблиці 2 фактори, які визначально впливають на прийняття рішення щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення (за критеріями тривалості та/або вартості), визначені на основі вивчення літературних першоджерел і аналізу проектної документації промислових будівель, з урахуванням актуальної концепції сталого розвитку.

Слід зауважити, що в цьому дослідженні доцільно застосовувати безрозмірні фактори, значення яких змінюються в межах від 0 до 1 залежно від сили впливу конкретного фактора на досліджувані техніко-економічні показники (тривалість, вартість).

На основі отриманих показників визначальних факторів, застосовуючи статистично достовірні моделі для обґрунтування тривалості і вартості реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення, визначаємо прогнозовані тривалість і вартість такої реконструкції.

Якщо прогнозовані значення тривалості і вартості реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення не відповідають вимогам замовника, здійснюється коригування вихідних параметрів, повторний розрахунок значень визначальних факторів, а також значень тривалості і вартості реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення за економіко-статистичними моделями.

Якщо прогнозовані значення тривалості і вартості реконструкції промислового підприємства зі зміною функціонального призначення відповідають вимогам замовника, переходимо до обчислення значення ризику проекту (R_{np}).

Якщо значення ризику, асоційоване з конкретним проектом реконструкції

промислового підприємства зі зміною функціонального призначення (R_{np}), більше за рівень допустимого ризику ($R_{дон}$), необхідно з'ясувати, чи можливо знизити рівень ризику проекту. Якщо така можливість існує, розробляють заходи щодо зниження рівня ризику проекту.

Після цього знову перевіряється умова $R_{np} \leq R_{дон}$. Якщо ця умова не виконується, приймається рішення про недоцільність подальшого розгляду і реалізації проекту. Якщо ж умова виконується, для будівлі, розташованої на схилі, обчислюється значення коефіцієнта стійкості з отриманням інтервальних значень.

Після цього перевіряється дотримання умови $K_{cm} \geq [K]$. Якщо ця умова не дотримується, необхідно розробити заходи, спрямовані на підвищення стійкості схилу.

Якщо вказана умова дотримується, це означає, що умова стійкості схилу виконується.

Таким чином, отримуємо прогнозовані значення тривалості і вартості реконструкції промислового підприємства зі зміною функціонального призначення, засновані на оцінюванні умов реконструкції, з урахуванням існуючих ресурсних обмежень, забезпеченням збалансованості можливостей замовника і виконавця робіт, дотриманням вимог щодо безпечності, екологічності, якості та енергоефективності об'єктів, прийнятного рівня ризику, умов стійкості схилів та стійкості будівель, розташованих на схилах.

У випадку, коли користувачем запропонованого алгоритму постає замовник або інвестор, доцільно також врахувати містобудівну цінність території шляхом множення прогнозованого значення вартості реконструкції промислового підприємства зі зміною функціонального призначення на відповідний коефіцієнт.

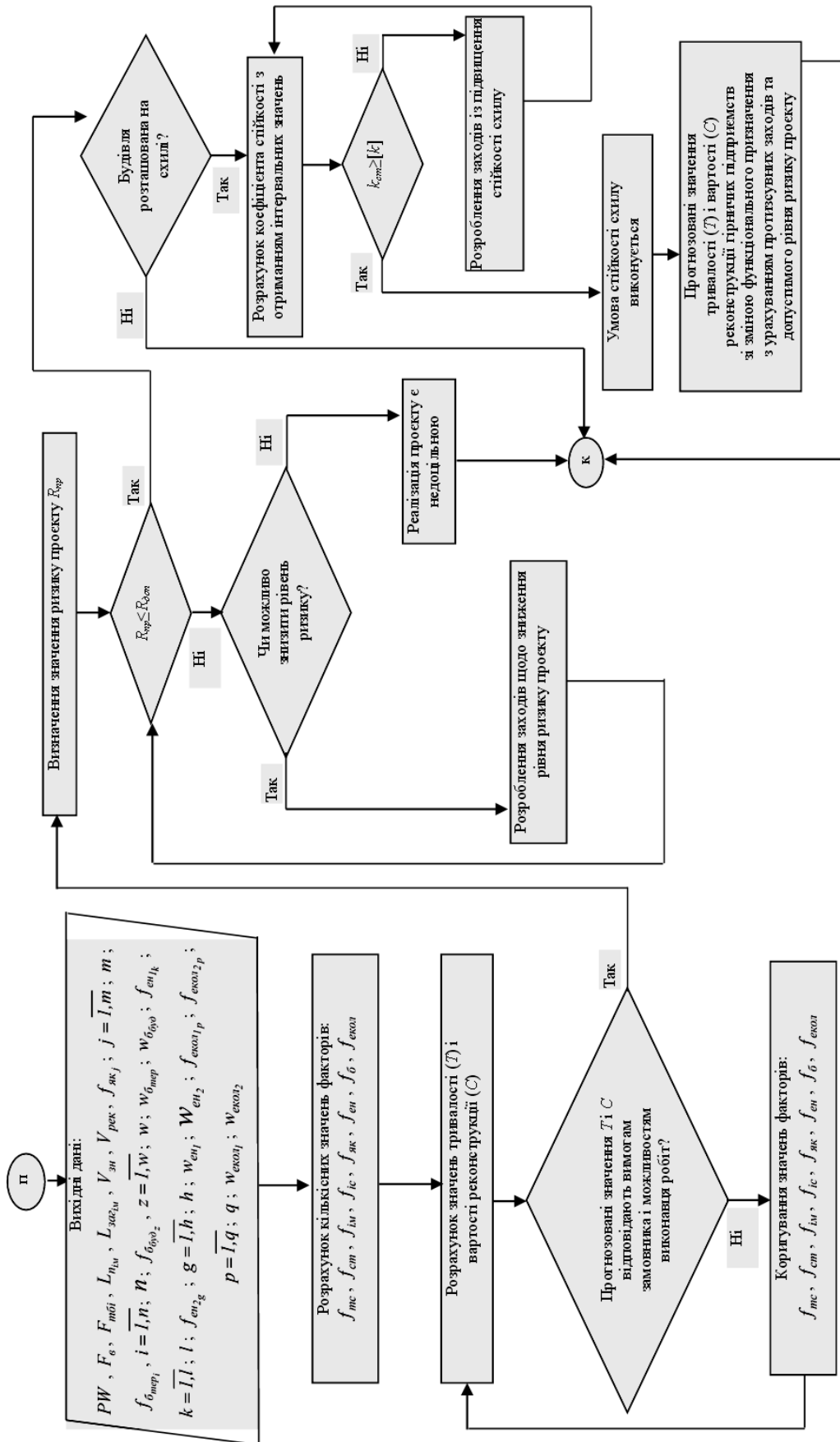


Рис. 1. Алгоритм прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення

Таблиця 1

Перелік вихідних даних, необхідних для розроблення, оцінювання, аналізу і вибору раціональних рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення

№ п/п	Найменування параметрів	Умовне позначення
1	Фізичний знос об'єкта реконструкції	PDB
2	Вільна площа території об'єкта реконструкції	F_{free}
3	Площа, необхідна для розміщення тимчасової будівельної інфраструктури	F_{tbi}
4	Протяжність інженерних мереж, які потребують перенесення (захисту) в процесі реконструкції	$L_{reloc_{en}}$
5	Загальна протяжність інженерних мереж об'єкта реконструкції	$L_{tot.len_{en}}$
6	Будівельний об'єм інженерних споруд, які підлягають знесенню	BV_{dem}
7	Будівельний об'єм інженерних споруд, які підлягають реконструкції	BV_{rec}
8	Складові фактора якості будівлі	f_{qual_j}
9	Кількість складових фактора якості будівлі	m
10	Складова фактора енергоефективності, яка характеризує поліпшення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій	f_{en_1}
11	Складова фактора енергоефективності, яка характеризує споживання енергетичних ресурсів інженерними системами	f_{en_2}
12	Коефіцієнт вагомості складової фактора енергоефективності, яка характеризує поліпшення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій	w_{en_1}
13	Коефіцієнт вагомості складової фактора енергоефективності, яка характеризує споживання енергетичних ресурсів інженерними системами	w_{en_2}
14	Елементи складової фактора енергоефективності, яка характеризує поліпшення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій	f_{en_k}
15	Кількість елементів складової фактора енергоефективності, яка характеризує поліпшення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій	l
16	Елементи складової фактора енергоефективності, яка характеризує споживання енергетичних ресурсів інженерними системами	$f_{en_{2g}}$
17	Кількість елементів складової фактора енергоефективності, яка характеризує споживання енергетичних ресурсів інженерними системами	h
18	Безпечність території	$f_{sec_{ter}}$
19	Безпечність будівлі	$f_{sec_{buil}}$
20	Коефіцієнти вагомості складових безпечності території	$w_{sec_{ter}}$
21	Коефіцієнти вагомості складових безпечності будівлі	$w_{sec_{buil}}$
22	Складові безпечності території	$f_{sec_{teri}}$
23	Кількість складових безпечності території	n
24	Складові безпечності будівлі	$f_{sec_{buil_z}}$
25	Кількість складових безпечності будівлі	w
26	Фактор екологічності зовнішнього середовища будівлі	f_{eco_1}
27	Фактор екологічності внутрішнього середовища будівлі	f_{eco_2}
28	Коефіцієнт вагомості складової фактора екологічності зовнішнього середовища будівлі	w_{eco_1}
29	Коефіцієнт вагомості складової фактора екологічності внутрішнього середовища будівлі	w_{eco_2}
30	Елементи складової фактора екологічності зовнішнього середовища будівлі	$f_{eco_{1p}}$
31	Кількість елементів складової фактора екологічності зовнішнього середовища будівлі.	q

Таблиця 2

Фактори, які визначально впливають на прийняття рішення щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення

№ з/п	Найменування факторів	Умовне позначення факторів	Розрахункова формула	Межі значень факторів
1	Фактор технічного стану будівлі	f_{tc}	$f_{tc} = 1 - \frac{PDB}{100}$	[0; 1]
2	Фактор стисненості території об'єкта реконструкції	f_{constr}	$f_{constr} = \frac{F_{free}}{F_{tbi}}$	[0; 1]
3	Фактор насиченості території підприємства інженерними спорудами та умов їх експлуатації	$f_{eng.str}$	$f_{eng.str} = \frac{V_{dem}}{V_{rec}}$	[0; 1]
4	Фактор насиченості території підприємства інженерними мережами та умов їх експлуатації	$f_{eng.net}$	$f_{eng.net} = \frac{L_{reloc.en}}{L_{tot.len.en}}$	[0; 1]
5	Фактор якості будівлі	f_{qual}	$f_{qual} = \frac{\sum_{j=1}^m f_{qual_j}}{m}$	[0; 1]
6	Фактор енергоефективності будівлі	f_{en}	$f_{en} = f_{en_1} \cdot w_{en_1} + f_{en_2} \cdot w_{en_2}$	[0; 1]
7	Фактор безпечності будівлі	f_{sec}	$f_{sec} = f_{sec_{er}} \cdot w_{sec_{er}} + f_{sec_{buil}} \cdot w_{sec_{buil}}$	[0; 1]
8	Фактор екологічності будівлі	f_{eco}	$f_{eco} = f_{eco_1} \cdot w_{eco_1} + f_{eco_2} \cdot w_{eco_2}$	[0; 1]

Висновки.

Запропонований удосконалений алгоритм прийняття рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення забезпечує можливість:

– урахування особливостей об'єкта реконструкції та умов виконання робіт через множину визначальних технологічних, технічних і управлінських факторів та одержання на цій основі обґрунтованих значень тривалості і вартості реконструкції промислових підприємств зі зміною їх функціонального призначення залежно від наявної вихідної інформації;

– отримання кількісних значень показників ефективності ухвалюваних управлінських рішень щодо реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення за заданих ресурсних обмежень та мінімізації рівня підприємницького ризику;

– уточнення кількісних значень часових і вартісних показників проєктів

реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення на різних етапах життєвого циклу шляхом варіювання значень параметрів, які входять до складу визначальних факторів.

Запропонований удосконалений алгоритм до оцінювання умов реконструкції промислових підприємств зі зміною функціонального призначення і обґрунтування їх ефективності ухвалюваних рішень призначений, передусім, для потреб замовників та інвесторів. Такий алгоритм може бути використаний під час формування договірних відносин, проведення підрядних торгів. Використовуючи запропонований удосконалений алгоритм, у подальших дослідженнях доцільно розробити прикладний програмний продукт, який дозволить суттєво спростити процеси введення та обробки вихідних даних, пошук і аналіз даних, подання інформації у табличному та/або графічному вигляді.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sustainable development and circular economy: trends, innovations, prospects: scientific monograph. Eds. Diakon R., Kucher A., Heldak M. Riga : Baltija Publishing, 2024. 384 p. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-390-3>

2. Sustainable Development Policy : EU Countries Experience. Edited by N. V. Stoyanets. Warsaw : RS Global Sp. z O. O., 2022. 187 p. URL: <https://doi.org/10.31435/rsglobal/049>
3. Ковальов В. В. Науково обґрунтований підхід до економічної та соціально прийнятної реконструкції депресивних промислових територій і підприємств. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 3. С. 74–80. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.74.199>
4. Гайдін А. М., Собко Б. Ю. Ревіталізація. Відновлення порушених ландшафтів в зонах діяльності гірничих підприємств : монографія. Дніпро : Журфонд, 2019. 218 с. ISBN 978-966-934-182-2.
5. Іванов Є., Ковальчук І. Деструкція гірничопромислових ландшафтів. *Journal of Education, Health and Sport*. 2016. № 6 (5). С. 369–392. URL: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.53161>
6. Mesthrige J. W., Wong J. K. W., Yuk L. N. Conversion or redevelopment? Effects of revitalization of old industrial buildings on property values. *Habitat International*. 2018. № 73. Pp. 53–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.12.005>
7. Гайко Ю. І., Гнатченко Є. Ю., Завальний О. В., Шишкін Е. А. Реновація промислової забудови та її адаптація до сучасного міського середовища : монографія. Харків : Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 2021. 353 с. ISBN 978-966-695-526-8.
8. Omelianenko, V., Prokopenko O., Tirtio T. Eds. Territory of innovations: best practices for sustainable development at the local level. Part 1: digest of analytical stage of international scientific and educational project : collective monograph. Tallinn : Teadmus Publ., 2022. 227 p. ISBN 978-9916-9704-7-8.
9. Ren L., Shih L., McKercher B. Revitalization of industrial buildings into hotels : Anatomy of a policy failure. *International Journal of Hospitality Management*. 2014. № 42. Pp. 32–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2014.06.007>.
10. Pivniak H. H., Tabachenko M. M., Dychkovskiy R. O., Falshtynskiy V. S. Risk management in mining activities: monograph. Dnipropetrovsk : National Mining University, 2015. 288 p. ISBN 978-966-350-534-3.
11. Papizh Yu., Kosolapov A., Yudenko V. Management of the mining enterprises in a sustainable way. *Effective Economy*. 2021. № 3. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/3_2021/72.pdf
12. Шумаков І. В., Гринчук О. А., Фурсов Ю. В. Перспективність техногенних територій для міського цивільного будівництва. *Науковий вісник будівництва*. 2016. № 3 (85). С. 73–76. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2016_3_17
13. Ковальов В. В., Кулецак З. П. Специфіка редевелопменту нераціонально використовуваних промислових територій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 5. С. 69–74. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/129339/124834>
14. Shao Qi.-G., Liou J. J. H., Weng S.-S., Chuang Ye.-C. Improving the Green Building Evaluation System in China Based on the DANP Method. *Sustainability*. 2018. № 10 (4). P. 1173. URL: <https://doi.org/10.3390/su10041173>
15. Yeang K., Spector A. Green design : from theory to practice : monograph. London : Black Dog, 2011. ISBN 9781907317125.
16. Чернишев Д. О. Методологія, аналітичний інструментарій та практика організації біосферосумісного будівництва : монографія. Київ : КНУБА, 2017. 294 с.
17. Чернишев Д. О., Заяць Є. І., Ковальов В. В. Вимоги до інструментарію організаційнотехнологічного супроводу проєктів біосферосумісного будівництва. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 4. С. 48–55. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.231018.48.310>
18. Системи прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах: від теорії до практики: колективна монографія. За заг. ред. Л. М. Савчук Павлоград : АРТ Синтез-Т, 2014. 429 p. ISBN 978-617-7232-00-0. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/33756958.pdf>
19. Технології прийняття управлінських рішень : монографія. За заг. ред. О. І. Кузнецової. Харків : Діса плюс, 2023. 430 с. ISBN 978-617-8122-26-3.
20. Zavadskas E. K., Antucheviciene J., Vilutiene T., Adeli H. Sustainable Decision-Making in Civil Engineering, Construction and Building Technology. *Sustainability*. 2018. № 10 (1). P. 14. URL: <https://doi.org/10.3390/su10010014>

REFERENCES

1. Sustainable development and circular economy : trends, innovations, prospects : scientific monograph. Eds. Diakon R., Kucher A., Heldak M. Riga : Baltija Publishing, 2024, 384 p. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-390-3>
2. Sustainable Development Policy : EU Countries Experience. Edited by N.V. Stoyanets. Warsaw : RS Global Sp. z O. O., 2022, 187 p. URL: <https://doi.org/10.31435/rsglobal/049>
3. Kovalov V.V. *Naukovo obgruntovanyy pidkhid do ekonomichnoyi ta sotsial'no pryyniatnoyi rekonstruktsiyi depresyynykh promyslovykh terytoriy i pidpryyemstv* [Scientifically based approach to economical and socially acceptable reconstruction of depressed industrial territories and enterprises]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 3, pp. 74–80. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.74.199> (in Ukrainian).

4. Haidin A.M. and Sobko B.Yu. *Revitalizatsiya. Vidnovlennya porushenykh landshaftiv v zonakh diyal'nosti hirnychokh pidpryyemstv : monohrafiya* [Revitalisation. Restoration of disturbed landscapes in areas of mining enterprises activity : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2019, 218 p. ISBN 978-966-934-182-2. (in Ukrainian).
5. Ivanov I. and Kovalchuk I. *Destruktsiya hirnychopromyslovykh landshaftiv* [The destruction of mining landscapes]. Journal of Education, Health and Sport. 2016, no. 6 (5), pp. 369–392. URL: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.53161> (in Ukrainian).
6. Mesthrige J.W., Wong J.K.W. and Yuk L.N. Conversion or redevelopment? Effects of revitalization of old industrial buildings on property values. Habitat International. 2018, no. 73, pp. 53–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.12.005>.
7. Haiko Yu.I., Hnatchenko Ye.Yu., Zavalnyi O.V. and Shyshkin Ye.A. *Renovatsiya promyslovyi zabudovy ta yiyi adaptatsiya do suchasnoho mis'koho seredovyshcha : monohrafiya* [Renovation of industrial buildings and their adaptation to the modern urban environment : monograph]. Kharkiv : O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2021, 353 p. ISBN 978-966-695-526-8. (in Ukrainian).
8. Omelianenko V., Prokopenko O., Tirto T. and oth. Territory of innovations : best practices for sustainable development at the local level. Part 1 : digest of analytical stage of international scientific and educational project : collective monograph. Tallinn : Teadmus Publ., 2022, 227 p. ISBN 978-9916-9704-7-8.
9. Ren L., Shih L., McKercher B. Revitalization of industrial buildings into hotels : Anatomy of a policy failure. International Journal of Hospitality Management. 2014, no. 42, pp. 32–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2014.06.007>.
10. Pivniak H.H., Tabachenko M.M., Dychkovskiy R.O. and Falshtynskiy V.S. Risk management in mining activities: monograph. Dnipropetrovsk : National Mining University, 2015, 288 p. ISBN 978-966-350-534-3.
11. Papizh Yu., Kosolapov A. and Yudenko V. Management of the mining enterprises in a sustainable way. Effective Economy. 2021, no. 3. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/3_2021/72.pdf
12. Shumakov I.V., Hrynychuk O.A. and Fursov Yu.V. *Perspektyvnist' tekhnohennykh terytoriy dlya mis'koho tsyvil'noho budivnytstva* [Prospects of technogenic areas for urban civil engineering]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Civil Engineering]. 2016, no. 3 (85), pp. 73–76. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2016_3_17. (in Ukrainian).
13. Kovalov V.V. and Kuleshchak, Z.P. *Spetsyfika redevelopmentu neratsional'no vykorystovuvanykh promyslovykh terytoriy* [Specificity of redevelopment of inefficiently used industrial territories]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 5, pp. 69–74. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/129339/124834>. (in Ukrainian).
14. Shao Qi.-G., Liou J.J.H., Weng S.-S. and Chuang Ye.-C. Improving the Green Building Evaluation System in China Based on the DANP Method. Sustainability. 2018, no. 10 (4), pp. 1173. URL: <https://doi.org/10.3390/su10041173>.
15. Yeang K. and Spector A. Green design : from theory to practice: monograph. London: Black Dog Publ., 2011. ISBN 9781907317125.
16. Chernyshev D.O. *Metodolohiya, analitychnyy instrumentariy ta praktyka orhanizatsiyi biosferosumisnoho budivnytstva: monohrafiya* [Methodology, analytical tools and practices for organising biosphere-compatible construction: monograph]. Kyiv : Kyiv National University of Construction and Architecture, 2017, 294 p. ISBN 978-966-627-195-5. (in Ukrainian).
17. Chernyshev D.O., Zaiats Ye.I. and Kovalov V.V. *Vymohy do instrumentariyu orhanizatsiyotekhnolohichnoho suprovodu proektiv biosferosumisnoho budivnytstva* [Requirements to the tools of organizational and technological support of projects of biocompatibility buildings]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 4, pp. 48–55. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.231018.48.310>. (in Ukrainian).
18. Savchuk L.M. *Systemy pryynyattya rishen' v ekonomitsi, tekhnitsi ta orhanizatsiynykh sferakh : vid teorii do praktyky : kolektyvna monohrafiya* [Decision-making systems in economics, technology and organisational spheres : from theory to practice : collective monograph]. Pavlohrad : ART Syntez-T Publ., 2014, 429 p. ISBN 978-617-7232-00-0. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/33756958.pdf>. (in Ukrainian).
19. Kuznetsova I.O. *Tekhnolohiyi pryynyattya upravlins'kykh rishen' : monohrafiya* [Managerial decision-making technologies: monograph]. Kharkiv : Disa Plus Publ., 2023, 430 p. ISBN 978-617-8122-26-3. (in Ukrainian).
20. Zavadskas E.K., Antucheviciene J., Vilutiene T. and Adeli H. Sustainable Decision-Making in Civil Engineering, Construction and Building Technology. Sustainability. 2018, no. 10 (1), p. 14. URL: <https://doi.org/10.3390/su10010014>.

Надійшла до редакції: 08.04.2024 р.

УДК 72.01

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.117.1064

МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ВІЗУАЛЬНИМИ ЯКОСТЯМИ ОСВІТЛЕННЯ ПУБЛІЧНИХ ПРОСТОРІВ МІСТА

КОНОНЕНКО Г. Ю., *ст. виклад.*

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, e-mail: anndis13@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-6102-0967

Анотація. Постановка проблеми. Освітлення – важливий аспект створення привабливого та комфортного міського середовища. Воно може поліпшити естетику нічних міст, виділяючи архітектурні деталі, підкреслюючи значущі місця та створюючи зони для громадської взаємодії. Грамотно спроектоване освітлення позитивно впливає на здоров'я та комфорт громадян. Воно може поліпшити настрій, сон, зменшити втомленість та поліпшити зорову функцію. З розвитком нових технологій освітлення та цифрових інновацій стає можливим упровадження в архітектурну практику сучасних підходів до планування міського освітлення. На сучасному етапі інноваційного розвитку технологій вуличного освітлення все більшу роль відіграють Urban Lighting Masterplan (ULMP). Це стратегії, що регламентують та фіксують основні вимоги до організації сталого штучного освітлення міських просторів. Дослідження присвячене принципам управління візуальними якість освітлюваного архітектурного середовища. Вперше пропонується каркас формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища. Як перспективний інструментарій управління візуальними якість освітлення розглядається GIS, рівні якої формуються відповідно до функцій візуального комфорту. Визначено дев'ять функцій візуального комфорту, кожна з яких є базою для створення шарів GIS: адаптивна; аксіологічна; компенсаторна; інтегрувальна; естетична; культурна; функція соціальної пам'яті; гносеологічна; етична. Кожний наступний шар додає свої джерела світла. Для кожної з цих дев'яти функцій запропоновано дві властивості освітлення: колір і світло. Кожна властивість описується чотирма характеристиками: колір – насиченість, світлота, кольорова температура, кольоровий тон; світло (світловий потік) – яскравість, освітленість, контрастність. **Висновки.** Сформовано уявлення про підходи та структуру оцінки візуальних якостей освітлюваних публічних просторів. Висунуто гіпотезу про те, що оптимальним підходом до аналізу існуючих ситуацій в освітленні відкритих публічних просторів та формуванні комплексів вимог щодо поліпшення їх візуальних якостей є використання GIS. Сформовано гіпотезу про структуру критеріїв оцінки візуальних якостей освітлення, заснованої на психофізіологічних, емоційно-естетичних та образно-художніх рівнях сприйняття архітектурного середовища. Таким чином підхід, описаний у статті, дає змогу сформулювати критерії оцінки візуального комфорту штучного освітлення публічних просторів.

Ключові слова: *штучне світло; GIS; візуальний комфорт; Urban Lighting Masterplan*

METHODS FOR MANAGING VISUAL QUALITIES OF LIGHTING IN PUBLIC SPACES OF THE CITY

KONONENKO H.Yu., *Sen. Lect.*

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, e-mail: : anndis13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6102-0967

Abstract. Raising of problem. Lighting is an important aspect of creating an attractive and comfortable urban environment. It can enhance the aesthetics of night-time cities by highlighting architectural details, highlighting significant urban locations and creating areas for public interaction. Properly designed lighting affects the health and comfort of citizens. It can improve mood, sleep, reduce fatigue and improve visual function. With the development of new lighting technologies and digital innovations, it becomes possible to introduce modern approaches to urban lighting planning into architectural practice. At the present stage of innovative development of street lighting technologies, the Urban Lighting Masterplan (ULMP) is playing an increasingly important role. These are strategies that regulate and fix the basic requirements for organizing sustainable artificial lighting in urban spaces. **Purpose.** This study is devoted to the principles of managing the visual qualities of the illuminated architectural environment. For the first time, a framework for the formation of criteria for assessing the visual qualities of the architectural environment is proposed. GIS is considered as a promising tool for managing the visual qualities of lighting, the levels of which are formed in accordance with the functions of visual comfort. The following nine basic functions of visual comfort are defined, each

of which is the basis for creating GIS layers: 1. Adaptive; 2. Axiological; 3. Compensatory; 4. Integrating; 5. Aesthetic; 6. Cultural; 7. Social memory function; 8. Epistemological; 9. Ethical. Each subsequent layer adds its own light sources. For each of these nine functions, two lighting properties are proposed: color and light. Each property is described by four characteristics: color – saturation, lightness, color temperature, color tone; light (luminous flux) – brightness, illumination, contrast. **Conclusion.** An idea of the approaches and structure of the assessment of the visual qualities of illuminated public spaces has been formed. It is hypothesized that the optimal approach to the analysis of existing situations in the lighting of open public spaces and the formation of sets of requirements for improving their visual qualities is the use of GIS. A hypothesis was formed about the structure of the criteria for assessing the visual qualities of lighting, based on the psychophysiological, emotional-aesthetic, and pictorial-artistic levels of perception of the architectural environment. Thus, the approach described in the article allows us to formulate criteria for assessing the visual comfort of artificial lighting of public spaces.

Keywords: *artificial lighting; GIS; visual comfort; Urban Lighting Masterplan*

Постановка проблеми. Сьогодні інновації в архітектурі, психології та генерації світла досягли такого рівня, на якому з'явилася принципова можливість розробити методи управління естетичними якостями штучного освітлення публічних просторів. До 1970 року вимоги щодо вуличного освітлення практично зводилися до цілей безпеки. Вимоги замовника були простими: дати максимум освітлення за мінімально можливою ціною. Наприкінці 1980-х років виникли нові потреби в освітленні, в яких усе більше уваги приділялося естетиці публічних просторів.

Дослідження психофізіологічних аспектів впливу штучного освітлення на людину отримали поштовх до активного розвитку з 1980-х років. Більш ранні експертні висновки стверджували, що яскраве нічне освітлення практично гарантує позитивний вплив на громадську безпеку у нічний час. Але цикли експериментів довели, що надмірне та неконтрольоване вуличне освітлення може навіть негативно вплинути на міські громади. Осліплення, що викликає дискомфорт, а іноді призводить до інвалідності, від погано спроектованого вуличного освітлення може зменшити світлосприйняття людського ока в нічний час, що знижує рівень безпеки на проїжджій частині. Проблеми дискомфорту штучного освітлення присвячені праці Гібонса та Едвардса [1], Ліна [2], Тюхова [3].

Інноваційний розвиток технологій вуличного освітлення з кожним роком робив проблематику візуального комфорту та безпеки для здоров'я дедалі гострішою. У результаті в 2016 році Рада з науки та

громадської охорони здоров'я Американської медичної асоціації (АМА) дійшла висновку, що повсюдне використання нічного освітлення створює потенційно шкідливі для здоров'я городян ефекти, і звернулася до уряду США з обґрунтуванням гострої необхідності більш ретельних досліджень впливу освітлення на здоров'я та безпеку людини, особливо з огляду на стрімке впровадження інновацій освітлення [4].

Сьогодні потрібен глибший та більш багатоаспектний аналіз характеристик освітлення, що враховує інформаційні процеси візуального сприйняття архітектурного середовища. Залучення до дослідження праць із сучасної психології сприйняття істотно поглиблюють розуміння складної ієрархічної структури процесів впливу архітектурного середовища на людину, дозволяють визначити механізми цього впливу, а також дослідити комфортні вимоги до візуально-екологічного стану сучасної архітектури, зокрема, проблем освітленості публічних просторів.

Аналіз публікацій. Узагальнення інформаційного масиву першоджерел, що описують базові аспекти формування освітлення відкритих публічних просторів, дозволило сформулювати предмет, цілі, завдання, межі та основну гіпотезу дослідження. Виявлено, що об'єкт дослідження належить до інноваційного тренду формування «Генеральних планів освітлення міст» (Urban Lighting Masterplan (ULMP)).

Urban Lighting Masterplan (ULMP) являє собою стратегічний документ, що регламентує та фіксує основні вимоги до

організації штучного освітлення міських просторів. Передбачається, що на підставі цього документа архітектори та світлотехніки розроблять локальні проекти освітлення, органічно вписані у загальний нічний дизайн міста [5].

Однак без розроблених нами підходів, що конкретизують, але не обмежують креативність архітекторів і світлотехніків, рекомендації щодо поліпшення деяких аспектів організації

штучного освітлення залишаються неповними.

На наш погляд, недостатня розробленість у провідних архітектурних шкіль методологічного апарату оцінювання візуальних якостей навколишнього середовища помітно стримує розвиток стратегічного планування, орієнтованого на підвищення бренду міст, комфорту та якості їх нічного життя, а, отже, і ділової активності.

Таблиця 1

Узагальнена структура майстер-плану освітлення відкритих міських просторів

Категорія	Складові елементи		
1. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	1.1. АНАЛІЗ ТЕРИТОРІЇ:		
	1.1.1	Історія району. Основні акценти та пам'ятки. Об'єкти, що виділяються городянами як знакові. Фотофіксація території у денний та нічний час	
	1.1.2	Аналіз існуючого освітлювального обладнання (з фотофіксацією поганого та гарного освітлення). Визначення ключових напрямів проведення глобального аудиту освітлення	
	1.1.3	Вимірювання існуючих рівнів освітленості та яскравості. Аналіз візуального комфорту освітлення.	
	1.1.4	Фіксація існуючих та планованих пішохідних, автомобільних та інших трафіків	
	1.1.5	Визначення нічної активності мешканців, гостей з інших міських районів та туристів	
	1.1.6	Визначення та фотофіксація існуючих ключових елементів міського простору (портали, кордони та мости, види та панорами/горизонти, місця зустрічей, домінанті, маршрути)	
	1.2. КОНСУЛЬТАЦІЇ ТА ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК:		
	1.2.1	З міською громадою та державними органами, такими як місцева рада, органи безпеки та самоврядування тощо.	
	1.2.2	Із ключовими членами проектної команди дизайнерів	
	1.2.3	З іншими експертами, такими як консультанти з біорізноманіття, екологи, історики, співробітники служби безпеки та технічного обслуговування	
	2. ПРОЕКТУВАННЯ	2.1. ТВОРЧА ЧАСТИНА (належить до творчої концепції):	
		2.1.1	Ключові креативні ідеї (високорівневий дизайн)
		2.1.2	Пропозиції щодо підходу до освітлення на всій території: пішохідні, велосипедні та автомобільні маршрути, будівлі та споруди, площі та місця зустрічей, ландшафт (твердий та м'який), сімейство світильників, що використовуються на всій території, модернізація існуючого освітлення, що прилягає до будівельного та охоронного освітлення, тощо)
2.2. ФОРМАТ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ІДЕЙ			
2.2.1		Мультимедійна візуальна презентація, дошки для презентацій, паперовий буклет і т.д. (Варіюється залежно від розміру проекту та угоди про контракт)	
2.3. ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА			
2.3.1		Визначення етапів проекту майстер-плану та зон майбутнього розвитку	
2.3.2		Визначення посилань на політику, стандарти, процедури та настанови в галузі освітлення	
2.3.3		Визначення процесу проектування освітлення на основі етапів архітектурного проекту для конкретної території (початок та здійсненість, концептуальний дизайн, розроблення дизайну, робочий проект та виробництво, будівництво, фокусування та програмування)	
2.3.4		Визначення пропозицій щодо сортаменту світильників для використання на всій території	
2.3.5		Визначення техніки освітлення залежно від характеру джерела світла	
2.3.6		Визначення техніки освітлення на основі інтеграції освітлювального обладнання	
2.3.7		Визначення типів джерел світла на основі їх технології	
2.3.8		Визначення типів світильників та їх приладдя	
2.3.9		Визначення технічних критеріїв на основі стандартів та правил освітлення в конкретній країні - горизонтальна та вертикальна освітленість, яскравість, однорідність, колірна температура, перенесення кольорів, відблиски, розташування та висота обладнання, технічне обслуговування (заміна та очищення)	
2.3.10		Визначення екологічних зон, що належать до ділянки	
2.3.11		Розроблення рекомендацій щодо освітлення для орендарів, роздрібною торгівлі, торгівлі, світлових вивісок та рекламних / медіафасадів, людей з обмеженими можливостями (інклюзивний дизайн), стійкості та енергоспоживання, навколишнього середовища та екології	
2.4. ФОРМАТ ПРЕЗЕНТАЦІЇ			
2.4.1	Буклет із документацією на паперовому носії з таблицями, схемами тощо. Електронний варіант документа у форматі PDF (для широкого публічного обговорення)		

Мета статті – запропонувати підходи, що потенційно здатні значно поліпшити якість розроблених майстер-планів. Для цього визначені такі завдання:

- Розробити принципи впровадження в архітектурну практику методів оцінювання візуальних якостей архітектурного середовища на двох (творчому та

аналітичному) базових етапах формування майстер-плану освітлення: на аналітичному етапі створюються карти реально існуючих візуальних якостей архітектурного середовища, на творчому – його очікуваних якостей. Карти формуються на основі трьох груп критеріїв оцінки, що відповідають психофізіологічному, емоційно-естетичному та образно-мистецькому рівням сприйняття видимого середовища.

- Запропонувати методи відображення візуального комфорту штучного освітлення, що базуються на функціях візуального комфорту.

Виклад матеріалу. Автор статті виконав порівняльний аналіз структур майстер-планів освітлення таких міст: Путраджайя, Сан-Антоніо, Солт-Лейк-Сіті, Вестмінстер, Перт, Страсбург, Мельбурн та Саншайн-Кост. На основі виконаної роботи з'явилася можливість генерації узагальненої структури майстер-плану освітлення відкритих міських просторів (табл. 1).

Каркас майстер-плану освітлення – це узагальнення найбагатшого практичного досвіду архітекторів, екологів, дизайнерів, медиків, технологів та адміністраторів багатьох країн світу. Різні архітектурні школи розробили підходи до створення майстер-планів освітлення, що корелюються між собою. Це свідчить, що питання вивчене достатньою мірою. Однак і в аналітичній, і в практичній частинах досліджених майстер-планів не вистачає критеріїв оцінки візуального комфорту,

композиційних характеристик та інформативності просторів, що освітлюються.

Виявлено, що в усіх проаналізованих майстер-планах комфорт освітленості оцінюється на підставі медичних даних про сприйняття штучного світла та суб'єктивних оцінок експертів. Подібний підхід практично ігнорує цілий комплекс процесів рецепції архітектурного простору.

Науково-практичні розробки школи О. О. Фоменко «Візуальна екологія архітектурного середовища» дозволяють розширити логіку створення каркаса майстер-планів освітлення відкритих міських просторів. Подібна впевненість ґрунтується на тому факті, що в жодному з вивчених генеральних планів фактично немає науково обґрунтованих карт візуального комфорту. Усі рекомендації експертів обмежуються такими показниками: світлове забруднення нічного неба, засліплення, світлове проникнення, різкі світлові та колірні контрасти, мерехтіння, довжина хвилі, втрата орієнтації тощо. При цьому чітких критеріїв комфортного сприйняття видимого архітектурного середовища не задано в жодній із проаналізованих робіт.

У статті вперше дається каркас формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища, який будується на основі функцій візуального комфорту (табл. 2).

Таблиця 2

Каркас формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища

Чинники формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища			Критерії оцінки візуальних якостей освітлення відкритих публічних просторів		
Рівні сприйняття архітектурної форми	Етапи формування архітектурного образу	Інформативність	Функція візуального комфорту архітектурного середовища	Характеристики освітлення архітектурного середовища	
				Властивості	Характеристика
Психофізіологічний рівень сприйняття архітектурної форми	Морфологічні характеристики архітектурного образу. Образ орієнтації формується за впливу наочно-дієвого мислення та тілесно-чуттєвої складової взаємодії з об'єктом; відповідає на запитання: де я? куди йти?	Насиченість середовища видимими елементами. Статистика середовища: чим більше відмінностей, надмірності, тим середовище більш динамічніше, інформативне.	1. Адаптивна – допомагає людині орієнтуватися до довкілля.	Колір	насиченість
					світлота
					кольорова температура
					кольоровий тон
				Світло	світловий потік
					яскравість
2. Аксиологічна	Колір	освітленість			
		контрастність			
					насиченість

			(ціннісна) – допомагає людині вибрати собі ті чи інші фрагменти архітектурного середовища.	Світло	світлота кольорова температура кольоровий тон світловий потік яскравість освітленість контрастність		
Емоційно-естетичний рівень сприйняття	Естетичні характеристики архітектурного образу. Образ інтуїції складається з продуктів несвідомо протікаючої розумової діяльності людини, зумовленої тілесністю людини; відповідає на запитання: як я відчуваюся?	Насиченість середовища емоційно активними елементами. Емоційна виразність, гра ліній, площин, кольору, просторів та обсягів, що становлять архітектурну форму як основа емоційного впливу на людину.	Емоційно-естетичні межі комфортного сприйняття архітектурного середовища				
			3. Компенсаторна (захисна) – допомагає людині у процесі сприйняття естетики довкілля відновлювати внутрішню емоційну гармонію	Колір	насиченість		
					світлота		
					кольорова температура		
				Світло	світловий потік		
					яскравість		
					освітленість		
			4. Інтегративна (що об'єднує) – створює в сприйнятті людини відчуття гармонійності, цілісності та причетності до навколишнього середовища	Колір	насиченість		
					світлота		
					кольорова температура		
				Світло	світловий потік		
					яскравість		
освітленість							
5. Гедоністична – формує задоволення від естетичних якостей архітектурного середовища	Колір	насиченість					
		світлота					
		кольорова температура					
	Світло	світловий потік					
		яскравість					
		освітленість					
Образно-художній рівень сприйняття	Семантичні ознаки культурного змісту архітектурного образу	Різноманітність архітектурного середовища	Образно-художні межі комфортного сприйняття архітектурного середовища				
			Образ визнавання, образ інтерпретації. Визначається впливом словесно-логічного та наочно-дієвого мислення; відповідає питанням: що це?	Образно-мистецька виразність рівня сприйняття архітектурного середовища як витвору мистецтва.	6. Культурна – формування культурно-стильових зразків особистості.	Колір	насиченість
							світлота
							кольорова температура
						Світло	світловий потік
							яскравість
							освітленість
			7. Функція соціальної пам'яті – формування візуальних акцентів, що виділяють історично значущі об'єкти архітектурного середовища.	Колір	насиченість		
					світлота		
					кольорова температура		
					Світло	світловий потік	
						яскравість	
освітленість							
8. Пізнавальна – мінлива, постійно оновлювана тканина суспільних	Колір	насиченість					
		світлота					
		кольорова					

			просторів. Потужний стимул розвитку туризму та бренду міста.	Світло	температура
					кольоровий тон
					світловий потік
					яскравість
					освітленість
			контрастність		
			9. Етична – формує етичні норми освітленості.	Колір	насиченість
					світлота
					кольорова температура
					кольоровий тон
Світло					
світловий потік					
яскравість					
освітленість					
контрастність					

Для зручності сприйняття даних, наведених у таблиці 2, дано розшифрування таких термінів:

Рівень зорового сприйняття – послідовність психічних процесів складання реципієнтом цілісного уявлення про видиме середовище. У дослідженні запропоновано три рівні сприйняття [6].

Категорія – група однорідних предметів чи явищ, об'єднаних за певними ознаками. Кожен рівень сприйняття поєднує кілька категорій, які, у свою чергу, включають критерії формування візуального комфорту штучного освітлення публічних просторів [7].

Критерій – представляє групу аспектів оцінки візуального комфорту штучного освітлення громадських просторів [8].

Аспект – елемент видимого середовища. У нашому випадку кожен із критеріїв оцінюється за двома основними аспектами сприйняття світла: інформативності кольору та яскравості.

Візуальний комфорт – це комплексне відчуття фізичної чи психологічної легкості, що часто характеризується як відсутність труднощів при візуальному сприйнятті навколишнього середовища [9].

Функція візуального комфорту навколишнього середовища – відчуття візуального комфорту складається з безлічі факторів фізичного та психічного характеру, що його зумовлюють. Кожному з цих факторів відповідають такі візуальні якості довкілля, що його задовольняють. Отже

функція візуального комфорту – це континуум візуальних якостей довкілля, орієнтованих на адресне задоволення того чи іншого чинника її сприйняття.

Характеристика освітлення – виходячи з предмета дослідження як властивості освітленості архітектурного середовища обрано колір та світло. Кожна властивість має набір характеристик, вибраних як критерії оцінки візуальних якостей освітленості відкритих публічних просторів.

Для кольору набір характеристик такий:

- насиченість – характеристика кольору, яка описує чистоту хроматичного кольору, що він чистіший, то більше насичений;

- світлота – це характеристика, яка визначає близькість кольору до білого;

- колірна температура – величина, яка відображає «відтінок» світла, що випромінюється, в градації від холодного до теплого. Вимірюється у градусах Кельвіна (K);

- колірний тон – визначає відсотковий вміст кольорів спектра у хроматичному кольорі.

Для світла основні набори показників такі:

- світловий потік – кількість випромінюваного світла;

- яскравість – показує, скільки світла відбивається від поверхні об'єкта у бік спостерігача;

- освітленість – показує щільність розподілу світлового потоку на заданій площі;

- контрастність – різниця в освітленості двох точок, що одночасно спостерігаються.

Каркас формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища структурно складається з двох блоків: факторів формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища та критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища.

Фактори формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища, у свою чергу, поділяються на такі групи:

- рівні сприйняття архітектурної форми: психофізіологічний; емоційно-естетичний та образно-художній;

- етапи формування архітектурного образу: морфологічні характеристики архітектурного образу (належать до психофізіологічного рівня сприйняття); естетичні характеристики архітектурного образу (належать до емоційно-естетичного рівня сприйняття); семантичні ознаки культурного змісту архітектурного образу (належать до образно-художнього рівня сприйняття);

- інформативність. На психофізіологічному рівні Інформативність визначається «насиченістю середовища видимими елементами» і належить до статистичних методів оцінювання видимого середовища. Чим більше відмінностей, надмірності, тим середовище більш динамічне, інформативне. Чим більше характерних візуальних ознак, що дозволяють безпомилково ідентифікувати навколишній простір, тим легше відбувається орієнтація в ньому. Однак тут слід особливо позначити той факт, що недостатня чи надмірна кількість видимих елементів навколишнього простору можуть ускладнити орієнтацію в ньому.

На психофізіологічному рівні сприйняття інформативність оцінюється за насиченістю середовища видимими елементами; на емоційно-естетичному рівні – за насиченістю середовища емоційно активними елементами; на образно-художньому – за стильовим розмаїттям архітектурного середовища;

Функція візуального комфорту архітектурного середовища.

Наступний чинник формування аспектів оцінки візуальних якостей архітектурного середовища у дослідженні названо «Візуальний комфорт архітектурного середовища». Цей фактор дозволяє визначати «психофізіологічні межі комфортного сприйняття архітектурного середовища». У цьому аспекті розгляду проблеми штучного освітлення відкритих просторів вкрай важливе поняття «Функції комфорту».

Професор Додж [10] визначив термін «комфорт» як «... наявність у людей психологічних, соціальних та фізичних ресурсів, необхідних їм для вирішення конкретних психологічних, соціальних та/або фізичних проблем». Отже, функцію комфорту в аспекті візуального сприйняття штучного освітлення відкритих публічних просторів можна визначити як візуальні якості середовища, що допомагають задовольняти конкретні психологічні, соціальні та/або фізичні проблеми людей, з тих, які можна задовольнити через органи зорового сприйняття.

Описані функції задають континуум аспектів оцінки візуального комфорту архітектурного середовища, що штучно освітлюється. Кожен з аспектів має набір морфологічних ознак, за якими його можна формалізувати та описати межі його комфортного сприйняття.

Характеристики аспектів архітектурного середовища на всіх рівнях сприйняття поділяються на візуальні характеристики освітлення: кольору та світлового потоку.

Колір – це суб'єктивна характеристика зорового сприйняття, зумовлена спектром світла, що взаємодіє з фоторецепторними клітинами ока. Фізичні характеристики кольору пов'язані з об'єктами або матеріалами на основі їх фізичних властивостей, таких як спектри поглинання, відбиття або випромінювання світла [11].

Характеристики світла – найважливіший показник освітленості публічних просторів, що регулюється безліччю нормативних національних та міжнародних актів.

Таким чином, визначено дев'ять функцій візуального комфорту: адаптивна; аксіологічна; компенсаторна; інтегруюча; естетична; культурна; функція соціальної пам'яті; гносеологічна; етична. Для кожної з цих функцій запропоновано дві властивості освітлення: колір і світло. Кожна властивість описується чотирма характеристиками: колір – насиченість, світлота, кольорова температура, кольоровий тон; світло (світловий потік) – яскравість, освітленість, контрастність.

У дослідженні пропонується кожному з функцій візуального комфорту виводити у вигляді окремого шару GIS, що дозволить комплексно оцінювати візуальний комфорт існуючого та проєктованого освітлення відкритих публічних просторів.

Концепція покровокового формування візуального комфорту штучного освітлення публічних просторів. Аналізуючи проблеми формування візуального комфорту штучного освітлення, слід особливо зазначити специфіку даного напрямку архітектурної діяльності. У процесі розроблення освітлення публічних просторів архітектор не створює нові об'єкти, а працює з існуючими, розробляючи світло-кольорову композицію, «граючись» із насиченістю, світлотою, кольором, контрастністю та іншими характеристиками світлових потоків [12].

Майстер-плани освітлення – це програмні документи, що намагаються впорядкувати та оптимізувати діяльність усіх учасників процесу освітлення міста. Вони задають загальний напрямок діяльності дизайнерів та архітекторів, формулюють загальну політику міста щодо нічного освітлення та регламентують більшість робочих моментів [13]. Це означає, що кожний розробник додає в карту загального освітлення публічного простору нові джерела світла, керуючись загальними вимогами програмного документа. При цьому формування візуального комфорту освітлення переважно спирається на смакові уподобання майстрів [14]. Частково це оправдано. Але потенційно може

спричинити невикористані витрати та світло-кольоровий хаос.

Майстер-плани освітлення за останні десятиріччя стали суттєвою складовою майстер-планів розвитку сучасних міст [15]. Але результати попередніх досліджень переконливо доводять, що в галузі керування параметрами візуального комфорту освітлення ще не напрацьовано достатньо практичного та теоретичного досвіду. Недостатня розробленість методологічної бази починає помітно стримувати досягнення цілей, задекларованих у більшості майстер-планів, що було проаналізовано.

Серед означених цілей, практично однакових для всіх планів, можна виділити такі: підвищення бренду міста, активація центрів у вечірній період, привабливість публічних просторів для прогулянок, патріотичне ставлення до міста та деякі інші.

Як рефлексія на виявлену проблему результатом даного дослідження стало створення концепції циклів формування візуального комфорту штучного освітлення публічних просторів із використанням інструментарію геоінформаційних систем.

Як указувалось раніше, кожна з дев'яти функцій візуального комфорту має характерні для неї вимоги щодо освітлення архітектурного середовища та критерії їх оцінювання. Завдяки цьому в дослідженні вперше пропонується використання функцій візуального комфорту як науково обґрунтованої бази для створення ієрархічної послідовності накладання шарів GIS. Також у дослідженні вперше пропонуються три цикли – етапи створення карти освітлення відкритих публічних просторів. Перший – формування освітлення; другий – регулювання параметрів освітлення, третій – корегування отриманих результатів. Докладніше про цикли далі по тексту.

Концепція циклів формування візуального комфорту штучного освітлення публічних просторів відображена в моделі (рис.), яка виглядає як спіраль, що складається із трьох витків, які розходяться

від центра до периферії. Кожному витку відповідає цикл формування світло-кольорового профілю освітлення відкритих

громадських просторів. Цикли складаються з дев'яти етапів, відповідних функціям візуального комфорту.

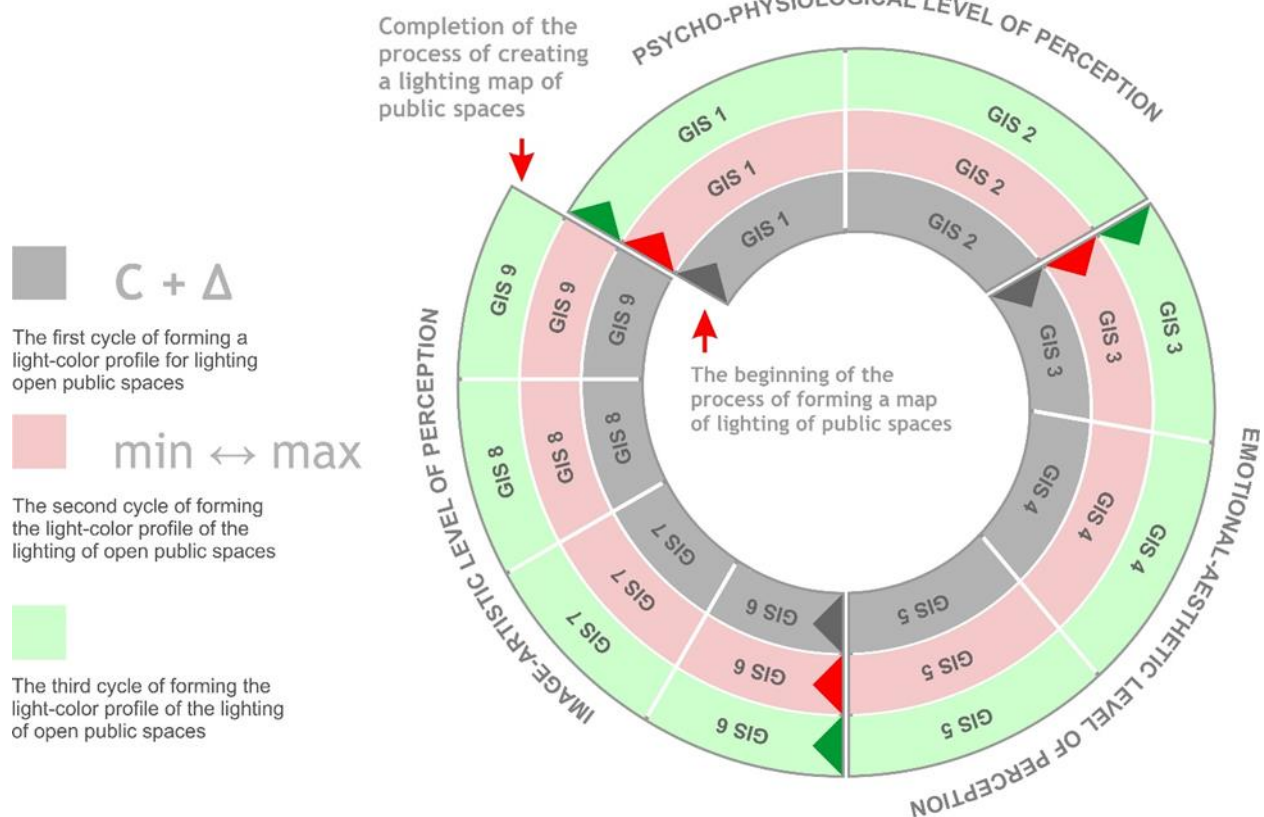


Рис. Модель формування візуального комфорту штучного освітлення публічних просторів

Перший цикл – «Формування карти освітлення», полягає у покроковому доданні джерел світла для задоволення потреб кожної з функцій візуального комфорту. В дослідженні розроблено ієрархічну послідовність накладання шарів GIS від першого шару – GIS 1 (Адаптивна функція візуального комфорту) до GIS 9 (Етичні норми освітлення). Всім шарам відповідають набори елементів архітектурного середовища, які треба освітити.

Нагадаємо, що на адаптивній функції це елементи, які відповідають за орієнтацію людини в просторі: шляхи та маршрути; орієнтири; краї – межі між двома освітлюваними областями тощо. Таким чином формується континуум джерел світла, що задовольняють потреби адаптивної функції. Кожна наступна функція (шар GIS n+1) додає свої джерела світла, світлокольорові параметри яких накладаються на попередні шари

геоінформаційної системи. До світлокольорових характеристик освітлення, що існують (C), додаються нові характеристики (Δ).

Перший цикл формування загальної карти освітлення публічних просторів – це практично ескізний етап проектування, на якому відбувається первинний набір джерел освітлення. Тут слід окремо зазначити, що цей набір джерел освітлення виконується не у вигляді «включення нових ламп», а відповідно до індивідуальних проектів освітлення всіх елементів відкритих публічних просторів. Для пояснення цього підходу можна навести таку послідовність:

Шар GIS 1. Адаптивна функція – допомагає людині орієнтуватися у навколишньому середовищі. На цьому шарі першими додаються проекти освітлення вулиць, перехресть, фіксуються основні орієнтири.

Шар GIS 2. Аксіологічна функція – допомагає людині вибрати собі ті чи інші

фрагменти архітектурного середовища. Цей рівень зверху шару 1 накладає проекти освітлення шлюзів, домінант, точок інтенсивної активності тощо.

Шар GIS 3. Компенсаторна функція пропонується як перший рівень обмеження агресивності світла. На цьому шарі відображені елементи архітектурного середовища, які допомагають людині досягати емоційної рівноваги. До таких елементів відносять локальні простори – зони відпочинку, вуличні кафе, набережні, алеї тощо. Як відомо яскраве, кольорово насичене світло руйнує компенсаторні функції візуального комфорту.

Шар GIS 4. Інтегровальна функція – створює в сприйнятті людини відчуття гармонійності, цілісності та причетності до навколишнього середовища. На цьому рівні додаються проекти освітлення перспектив, просторів комплекси забудови за єдиним мистецьким планом, майданів, площ тощо.

Шар GIS 5. Гедоністична – формує почуття естетичного задоволення від споглядання навколишнього, зокрема, й архітектурного середовища. На цьому рівні фіксуються міські краєвиди, пейзажі, архітектурні ансамблі як витвори архітектурного мистецтва. У своїй сукупності шари 1–5 створюють світло-кольорову основу для формування карт освітлення семантично насичених об'єктів образно-художнього рівня.

Шар GIS 6. Культурна функція – формування свідомості та смакових переваг соціуму, до об'єктів якої належать: релігійні, освітні та громадські центри.

Шар GIS 7. Функція соціальної пам'яті – формування візуальних акцентів, що виділяють історично значущі об'єкти архітектурної середовища, серед яких: меморіали та пам'ятні знаки, архітектурні об'єкти, що мають зв'язок із видатною особистістю або подією.

Шар GIS 8. Пізнавальна – мінлива, постійно оновлювана тканина суспільних просторів. Потужний стимул розвитку туризму та бренду міста. До цього рівня відносять локації свят, музейні та торговельно-розважальні комплекси, відкриті

майданчики та мости, туристичні маршрути, історичні центри міст тощо.

Шар GIS 9. Етична – формує етичні норми освітленості. Етична функція – це фінальний модуль формування параметрів освітлення та контролю за його візуальним комфортом. Тут є декілька важливих моментів.

Перший полягає в тому, що такі елементи міського середовища як вітрини магазинів, торговельні майданчики, рекламні панелі, сітілайти та деякі інші намагаються всіляко виділитись на загальному фоні освітлення. Це явище полягає у самій природі рекламних інформаційних елементів середовища. Часто вимоги замовників їх освітлення далеко виходять за межі естетики, художньої композиції та, навіть, здорового глузду.

Другий момент пов'язаний з намаганнями учасників нічного освітлення підвищити параметри безпеки своїх об'єктів, таких як зони, що особливо охороняються, будівельних майданчиків, автостоянок тощо.

Третій момент стосується намагань власників житла виділити своє майно серед інших.

До списку об'єктів, що регламентуються шарами 1–8 не потрапляють багато опцій, які потенційно здатні зруйнувати всю карту майстер-планів освітлення. Саме із цієї причини створено рівень 9 – етика освітлення, яка саме й регламентує роботу деяких недобросовісних власників нерухомості.

Другий цикл формування світло-кольорового профілю освітлення відкритих громадських просторів полягає у регулюванні параметрів освітлення, що сформовані у першому циклі. Треба особливо зазначити, що другий та третій цикли аналізують параметри освітлення всіх дев'яти шарів разом. Регулювання відбувається на підставі медичних та нормативних вимог, що здебільшого є критеріями оцінки комфорту освітленості на психофізіологічному рівні сприйняття.

Цей цикл регламентується такими межами комфортного сприйняття

освітленості як *min* та *max* показники двох базових параметрів: Кольору світла (насиченість, світлота, кольорова температура, кольоровий тон) та Світла (світловий потік, яскравість, освітленість, контрастність).

Фактично на цьому циклі регулювання майстер-плану загальна карта освітлення стає блідою, ніби жухне. Це очікуваний результат. Завдяки цьому циклу вирішується більшість конфліктів та невдалих перетинань світлокольорових потоків.

Третій цикл формування світлокольорового профілю освітлення відкритих громадських просторів полягає у корегуванні візуального комфорту освітлення на основі методів нейромаркетингу. Особлива риса цього циклу – те, що корегування освітленості публічних просторів відбувається на основі емоційно-естетичних критеріїв оцінювання візуальних якостей навколишнього середовища. На другому циклі регулювання параметрів освітлення відбувалося на основі психофізіологічних критеріїв оцінки.

Образно-художні критерії оцінювання зводяться до специфічних вимог суспільної свідомості та виявляються простим анкетуванням. Саме із цієї причини «Wow Factor», на який так наполегливо орієнтовані практично всі майстер-плани освітлення, можна спробувати досягнути саме на рівні емоцій. Саме із цієї причини як інструментарій аналізу освітленості на третьому циклі обрано методи нейромаркетингу. Це відгалуження нейробіології накопичило дуже багатий практичний матеріал з аналізу емоційно-естетичних реакцій людей на видиме оточення. Точність та швидкість обробки даних спонукають нас розглядати методи даної парадигми як такі, що мають величезний науково-практичний потенціал. Очікуваним результатом використання цієї інновації стало суттєве поліпшення візуальних якостей освітлення публічних просторів.

Висновки.

1. Уперше запропоновано метод формування критеріїв оцінки візуального

комфорту штучного освітлення відкритих публічних просторів на основі функції візуального комфорту. Розроблено каркас формування критеріїв оцінки візуальних якостей архітектурного середовища. Запропоновано розподіл функцій візуального комфорту за трьома рівнями сприйняття видимого середовища: психофізіологічним, емоційно-естетичним та образно-художнім.

2. Розроблено критерії оцінки візуальних якостей штучного освітлення відкритих публічних просторів на психофізіологічному рівні сприйняття. Для цього рівня сприйняття виділено дві функції візуального комфорту: адаптивна (перший шар) – допомагає людині орієнтуватися у довкіллі. аксіологічна (другий шар) – допомагає людині вибрати собі ті чи інші фрагменти архітектурного середовища.

3. Розроблено критерії оцінки візуальних якостей штучного освітлення відкритих громадських просторів на емоційно-естетичному рівні сприйняття. Для цього рівня сприйняття виділено три функції візуального комфорту. Компенсаторна (третій шар) – допомагає людині досягати емоційної рівноваги. Інтегрувальна (четвертий шар) – створює у сприйнятті людини відчуття гармонійності, цілісності та причетності до навколишнього середовища. Гедоністична (п'ятий шар) – формує почуття естетичного задоволення від споглядання навколишнього, у тому числі й архітектурного середовища.

4. Розроблено критерії оцінки візуальних якостей штучного освітлення відкритих публічних просторів на образно-художньому рівні. Для цього рівня сприйняття виділено чотири функції візуального комфорту. Культурна (шостий шар) – відповідає за формування культурно-стильових зразків особистості. Соціальної пам'яті (сьомий шар) – формування візуальних акцентів, що виділяють історично значущі об'єкти архітектурної середовища. Пізнавальна (восьмий шар) – мінлива тканина суспільних просторів, що постійно оновлюється. Потужний стимулом розвитку туризму та бренду міста. Етична

(дев'ятий шар) – формує етичні норми освітленості.

5. Розроблено принципи ієрархічної побудови шарів геоінформаційних систем відповідно до функцій візуального комфорту штучного освітлення відкритих

громадських просторів. У своїй сукупності це дозволяє створити модель шарів GIS, які на новому рівні допоможуть аналізувати та проектувати візуально комфортне освітлення відкритих громадських просторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gibbons R. B., Edwards C. J. Review of disability and discomfort glare research and future direction. *18th Biennial TRB Visibility Symposium [United States]* (April 17–19, 2007). College Station TX, United States, 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/228337685_A_Review_of_Disability_and_Discomfort_Glare_Research_and_Future_Direction (дата звернення: 15.01.2024).
2. Lin Y., Liu Y., Sun Y., Zhu X., Lai J., Heynderickx I. Model predicting discomfort glare caused by LED road lights. *Opt Express*. 2014. № 22 (15). Pp. 18056–18071. URL: <https://doi.org/10.1364/OE.22.018056> (date of access: 11.01.2024). (Назва з екрану).
3. Tyukhova Y. Discomfort glare from small, high luminance light sources in outdoor nighttime environments : Architectural Engineering Dissertations and Student Research. Lincoln, Nebraska, 2015. 296 p.
4. Motta M. American Medical Association Statement on Street Lighting. *Journal of American Association of Variable Star Observers*. 2018. Vol. 46, № 2. Pp. 193.
5. Zielinska-Dabkowska K. Urban lighting masterplan – origins, definitions, methodologies and collaborations. *Urban Lighting for People : Evidence-Based Lighting Design for the Built Environment*. Ed. by N. Davoudian. RIBA Publishing, 2019. Pp. 18–41.
6. Sanjana S., Guy B.-Y., Boix X. Minimal Images in Deep Neural Networks : Fragile Object Recognition in Natural Images. International Conference on Learning Representations New Orleans, Louisiana, United States, Feb. 8, 2019. ICLR, 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331208131_Minimal_Images_in_Deep_Neural_Networks_Fragile_Object_Recognition_in_Natural_Images#fullTextFileContent (дата звернення: 12.01.2024). (Назва з екрану).
7. Mill J. S. A System of Logic : Ratiocinative and Inductive. University Press of the Pacific, 2002. 644 p.
8. Schwandt T. A. Farewell to Criteriology. *Qualitative Inquiry*. 1996. Vol. 2, № 1. Pp. 58–72. URL: <https://doi.org/10.1177/107780049600200109> (дата звернення: 15.01.2024). (Назва з екрану).
9. Kolcaba K. Comfort Theory and Practice : a vision. for Holistic Health Care and Research. Springer Publishing Company, 2002. 288 p.
10. Dodge R., Daly A. P., Huyton J., Sanders L. D. Challenge of defining wellbeing. *International Journal of Wellbeing*. 2012. № 2 (3). Pp. 222–235. URL: <https://doi.org/10.5502/ijw.v2i3.4> (дата звернення: 12.01.2024). (Назва з екрану).
11. Waldman G. Introduction to light: physics of light, vision, and color. (Dover Books on Physics). Courier Corporation, 2002. 228 p.
12. Sholanke A. B., Fadesere O., Elendu D. The Role of Artificial Lighting in Architectural Design : a literature review. *International Conference on Energy and Sustainable Environment*. (Oct. 10–14, 2021). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/665/1/012008> (дата звернення: 12.01.2024). (Назва з екрану).
13. Rozman C. M. Sustainable City Lighting Impact and Evaluation Methodology of Lighting Quality from a User Perspective. *Sustainability*. 2021. № 13. P. 3409. URL: <https://doi.org/10.3390/su13063409> (дата звернення: 15.01.2024). (Назва з екрану).
14. Johansson M., Rosén M., Küller R. Individual factors influencing the assessment of the outdoor lighting of an urban footpath. *Lighting Research & Technology*. 2011. Vol. 43, № 1. Pp. 31–43. URL: <https://doi.org/10.1177/1477153510370757> (дата звернення: 10.01.2024). (Назва з екрану).
15. Tavares P., Ingi D., Araújo L., Pinho P., Bhusal P. Reviewing the Role of Outdoor Lighting in Achieving Sustainable Development Goals. *Sustainability*. 2021. № 13. Pp. 12657. URL: <https://doi.org/10.3390/su132212657> (дата звернення: 12.01.2024). (Назва з екрану).

REFERENCES

1. Gibbons R.B. and Edwards C.J. Review of disability and discomfort glare research and future direction. 18th Biennial TRB Visibility Symposium [United States], April 17–19, 2007, College Station TX, United States, 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/228337685_A_Review_of_Disability_and_Discomfort_Glare_Research_and_Future_Direction.
2. Lin Y., Liu Y., Sun Y., Zhu X., Lai J. and Heynderickx I. Model predicting discomfort glare caused by LED road lights. *Opt Express*. 2014, no. 22 (15), pp. 18056–18071. URL: <https://doi.org/10.1364/OE.22.018056>

3. Tyukhova Y. Discomfort glare from small, high luminance light sources in outdoor nighttime environments : Architectural Engineering Dissertations and Student Research. Lincoln, Nebraska, 2015, 296 p.
4. Motta M. American Medical Association Statement on Street Lighting. Journal of American Association of Variable Star Observers. 2018, vol. 46, no. 2, p. 193.
5. Zielinska-Dabkowska K. Urban lighting masterplan – origins, definitions, methodologies and collaborations. Urban Lighting for People : Evidence-Based Lighting Design for the Built Environment. RIBA Publ., 2019, pp. 18–41.
6. Sanjana S. Minimal Images in Deep Neural Networks : Fragile Object Recognition in Natural Images. International Conference on Learning Representations. New Orleans, Louisiana, United States, Feb. 8, 2019, ICLR, 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331208131_Minimal_Images_in_Deep_Neural_Networks_Fragile_Object_Recognition_in_Natural_Images#fullTextFileContent
7. Mill J.S. A System of Logic : Ratiocinative and Inductive. University Press of the Pacific, 2002, 644 p.
8. Schwandt T.A. Farewell to Criteriology. Qualitative Inquiry. 1996, vol. 2, no. 1, pp. 58–72. DOI: 10.1177/107780049600200109.
9. Kolcaba K. Comfort Theory and Practice : a vision for Holistic Health Care and Research. Springer Publishing Company, 2002, 288 p.
10. Dodge R., Daly A.P., Huyton J. and Sanders L.D. Challenge of defining wellbeing. International Journal of Wellbeing. 2012, no. 2 (3), pp. 222–235. DOI: 10.5502/ijw.v2i3.4.
11. Waldman G. Introduction to light: physics of light, vision, and color. Dover Books on Physics. Courier Corporation, 2002, 228 p.
12. Sholanke A.B., Fadesere O. and Elendu D. The Role of Artificial Lighting in Architectural Design : a literature review. International Conference on Energy and Sustainable Environment, Oct. 10-14, 2021, IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/665/1/012008.
13. Rozman C.M. Sustainable City Lighting Impact and Evaluation Methodology of Lighting Quality from a User Perspective. Sustainability. 2021, no. 13, p. 3409. DOI: 10.3390/su13063409.
14. Johansson M., Rosén M. and Küller R. Individual factors influencing the assessment of the outdoor lighting of an urban footpath. Lighting Research & Technology. 2011, vol. 43, no. 1, pp. 31–43. DOI: 10.1177/1477153510370757.
15. Tavares P., Ingi D., Araújo L., Pinho P. and Bhusal P. Reviewing the Role of Outdoor Lighting in Achieving Sustainable Development Goals. Sustainability. 2021, no. 13, p. 12657. DOI: 10.3390/su132212657.

Надійшла до редакції: 01.04.2024.

УДК 332.72:339.9:631.1

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.130.1065

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСВІДУ ФОРМУВАННЯ РИНКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ В ІНШИХ КРАЇНАХ

ЛАНДО Є. О.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
АНДРЕЄВА І. Г.², ас.,
ТРЕГУБ О. В.³, канд. техн. наук, доц.,
СТЕПАНЦОВА О. Є.⁴, студ.

^{1*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

² Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: andreieva.iryana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7083-8955

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

⁴ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: 19027.stepantsova@365.pdaba.edu.ua

Анотація. Україна стоїть перед викликом удосконалення ринку сільськогосподарських земель, що має велике значення для економічного та соціально-економічного розвитку сільського господарства. Відсутність чіткого плану дій у цьому напрямку через розбіжність поглядів учасників процесу потребує уваги. Розглянуто міжнародний досвід та визначено шляхи подальшого розвитку ринку земель в Україні. Аналіз кращих практик з інших країн може допомогти уникнути негативних наслідків та забезпечити відповідність європейським стандартам. Результати дослідження вказують на необхідність регулярного моніторингу ринку та вжиття заходів для забезпечення відповідності використання земель їх призначеності. **Мета** полягає у вивченні міжнародного досвіду з утворення ринку земель в Україні та визначенні можливостей його подальшого розвитку. **Практична значимість.** Важливе стратегічне завдання України – створення умов для дотримання всіх прав людини, включаючи право на вільне володіння, користування та розпорядження власним майном. Упровадження вільного ринку земель в Україні має потенціал сприяти появі свободи вибору, нових можливостей та перспектив розвитку як у сільському господарстві, так і в економіці загалом. **Результати.** Розглянуто як позитивні, так і негативні наслідки впровадження ринкових земельних відносин у різних країнах, визначено пріоритетні етапи розвитку цього процесу в нашій країні. Результати аналізу вказують на необхідність регулярного моніторингу ринку земель та вжиття заходів щодо забезпечення відповідності використання земель їх призначеності.

Ключові слова: соціально-економічний розвиток; організаційно-економічні механізми; ринковий обіг земель; європейські стандарти; міжнародний досвід; використання земель; моніторинг ринку земель

STUDYING THE EXPERIENCE OF FORMING AGRICULTURAL LAND MARKETS IN OTHER COUNTRIES

LANDO Ye.O.^{1*}, Ph. D., Assoc. Prof.,
ANDREIEVA I.G.², Ass.,
TREGUB O.V.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
STEPANTSOVA O.Ye.⁴, Stud.

^{1*} Department of Highways, Geodesy, and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

² Department of Highways, Geodesy, and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: andreieva.iryana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7083-8955

³ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

⁴ Department of Highways, Geodesy, and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: 19027.stepantsova@365.pdaba.edu.ua

Abstract. Ukraine is facing the challenge of improving the agricultural land market, which is of great importance for the economic and socio-economic development of agriculture. The lack of a clear action plan in this direction due to divergent views among stakeholders requires attention. International experience has been considered, and pathways for further development of the land market in Ukraine have been identified. Analyzing best practices from other countries can help avoid negative consequences and ensure compliance with European standards. The research findings indicate the need for regular market monitoring and measures to ensure that land use aligns with its intended purpose. **The purpose of the work.** The goal is to study international experience in establishing a land market in Ukraine and identifying opportunities for its further development. **Practical significance.** An important strategic task for Ukraine is to create conditions for the observance of all human rights, including the right to own, use, and dispose of property freely. The implementation of a free land market in Ukraine has the potential to contribute to the emergence of freedom of choice, new opportunities, and development prospects both in agriculture and in the economy as a whole. **Results.** Both positive and negative consequences of implementing market land relations have been considered in various countries, and priority stages of this process have been identified in our country. The results of the analysis indicate the need for regular monitoring of the land market and taking measures to ensure that land use aligns with its intended purpose.

Keywords: *social-economic development; organizational-economic mechanisms; land market transactions; European standards; international experience; land use; land market monitoring*

Постановка проблеми. Удосконалення ефективного розвитку ринку сільськогосподарських земель у нашій країні надзвичайно актуальне. Це стосується не лише загальної економічної динаміки, а й соціально-економічного розвитку сільського господарства та земельних відносин. Наразі відсутній чіткий план дій через розбіжність поглядів учасників процесу. Проте впровадження ефективних організаційно-економічних механізмів може забезпечити ефективний обіг земель, спрямовуючи їх до раціональних власників, які будуть екологічно використовувати їх та сприятимуть розвитку місцевих громад.

Виділення невирішеної проблеми. Основна мета полягає в оцінці міжнародного досвіду у формуванні ринку земель та визначенні можливостей його подальшого розвитку в Україні, з особливим акцентом на стимулюванні внутрішнього підприємництва та залученні іноземних інвестицій.

Мета дослідження – аналіз та впровадження кращих практик з інших країн може допомогти уникнути негативних наслідків ринкового обігу земель та забезпечити відповідність європейським стандартам у сільському господарстві.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів. Найцінніше багатство України – земля, яка належить до найкращих у світі за своєю природною родючістю. Згідно з

Конституцією України, земля є основним національним багатством, що підлягає особливій охороні держави [1].

Земля в Україні – це важливий національний ресурс, який користується особливим захистом держави, з гарантією права власності як для юридичних, так і для фізичних осіб. Однак дія мораторію перешкоджала малому та середньому бізнесу у втіленні їхніх планів. Ця проблема типова не лише для України, а й для інших країн із перехідною економікою, де земля націоналізована або контрольована владою. Такі проблеми виникали у всіх пострадянських країнах.

Багато вітчизняних та закордонних дослідників приділяють увагу аналізу та систематизації проблем, що стосуються формування та оптимального функціонування ринкового обігу земель, а також ефективного державного управління та регулювання цього процесу.

Наразі існує чітко визначена процедура отримання земель сільськогосподарського призначення у власність. Однак ми розглянемо, що може чекати нас у майбутньому, опираючись на досвід інших країн.

В європейських країнах вважають, що ринок землі буде ефективним, якщо земельні відносини відповідають інтересам держави та існує контроль за обігом земель сільськогосподарського призначення.

Ми дослідимо чотири основні типи регулювання ринку землі та його сучасний стан у Європі та світі.

Перший тип – закритий ринок, де відсутня повна реалізація права на земельну ділянку, характеризується обмеженою можливістю використання землі, зазвичай обмеженої лише орендою, через що відсутня чітка та справедлива ринкова ціна. Цей тип ринку найменш поширений і характерний для країн із низьким рівнем економіки й системною корупцією, таких як Білорусь, Венесуела, Конго, Куба, Північна Корея, Таджикистан, Україна. У Білорусі та Китаї більшість земель перебуває в державній власності, але теоретично громадяни можуть купувати землю, а іноземці можуть орендувати її.

Другий тип закритого ринку – відсутність для іноземців права на власність земельних ділянок сільськогосподарського призначення. Цей тип характерний для більшості пострадянських країн та тих, які вступили до ЄС пізніше. У таких країнах іноземці можуть лише орендувати землю. Проте, у багатьох із них ці правила порушуються. Наприклад, у Молдові іноземці можуть купувати земельні ділянки через подвійне громадянство.

Зараз спостерігається згортання цього типу ринку, оскільки країни усвідомлюють важливий внесок іноземців у економіку через укладення угод купівлі-продажу, що зумовлює підвищення продуктивності сільськогосподарського сектора.

Третій тип ринку землі – відкритий з обмеженнями. Отже, доступний для іноземців, але за умови виконання певних вимог, які також стосуються місцевих громадян. Ці умови можуть включати обмеження щодо площі придбання, вимоги до місця проживання та освіти покупця, а також необхідність дозволу від держави для продажу. Такий підхід до ринку землі поширений, оскільки дозволяє державі встановлювати умови, які відповідають потребам сільського господарства.

До країн третього типу належать Аргентина, Болгарія, Бразилія, Гватемала, Гондурас, Греція, Грузія, Данія, Канада,

Латвія, Литва, Мексика, Польща, Румунія, Словаччина, Туреччина, Угорщина, Фінляндія, Франція, Швейцарія та Японія. Наприклад, у скандинавських країнах, таких як Данія, активно підтримується розвиток сімейних фермерських господарств, а для придбання с/г земель вимагається відповідна освіта та професійна кваліфікація.

До четвертого типу належить відкритий ринок – це форма, де відсутні юридичні обмеження. Фізичні та юридичні особи, а також іноземці, мають повний доступ до придбання та використання с/господарських земель (вільного продажу). Цей тип привабливий для залучення інвестицій та використання земель у заставу. Він характерний для країн із високорозвиненою економікою, таких як Австралія, Австрія, Бельгія, Велика Британія, Домініканська Республіка, Естонія, Ірландія, Іспанія, Італія, Нідерланди, Німеччина, Португалія, США та Чехія.

Більшість країн перейшла до відкритого ринку землі після переходу від планової системи господарювання до ринкової економіки. У 1998 році Польща відкрила свій ринок земель, і цей крок вважається найбільш успішним серед усіх постсоціалістичних країн. Польща застосовує тип ринку земель, який можна охарактеризувати як відкритий з обмеженнями. У 2016 році країна відкрила ринок землі також для іноземних громадян, але з певними обмеженнями:

- іноземні громадяни мають право купувати земельні ділянки, лише якщо вони перебувають у шлюбі з громадянином країни та проживають у Польщі останні два роки;
- громадянам ЄС дозволено купувати землі;
- якщо покупець – фізична особа, то він повинен мати сільськогосподарську освіту або певний досвід роботи;
- максимальна площа для купівлі – 500 га;
- ціни регулюються на ринку;
- податок на продаж ділянки становить від 2 до 5 % залежно від суми покупки;

- якщо ділянку орендують протягом трьох років, орендар має право її купити. Всі угоди контролює Сільськогосподарське агентство нерухомості [2; 3].

Після отримання незалежності Латвія стала однією з перших країн на пострадянському просторі, яка почала впроваджувати відкритий ринок земель сільськогосподарського призначення та намагалась повернути у власність землі людям, які втратили це право після 1940 року.

Сільське господарство – важлива складова економіки Латвії: 32,6 % жителів цієї країни проживають у сільській місцевості, 7,3 % зайняті в агропромисловому комплексі, 99 % земель перебуває у приватній власності. У Латвії діють обмеження для іноземців:

- набуття права придбання після трьох років оренди ділянки;
- юридичним особам – іноземцям надається право купівлі, якщо частка акцій компанії належить іноземцю;
- обмеження у площі не встановлюють;
- ціни регулюють ринком;
- податок – 1,55 % від вартості землі;
- власник сусідньої ділянки має переважне право на її придбання [3; 4].

Ситуація на ринку землі в Латвії у 2017 році була така: більшу частку земель викупили іноземці, й жителі країни брали в оренду в принципі свою ж землю. Іноземці купили землю, але насправді не користувались нею: із 2,3 млн га використовували лише половину.

Враховуючи ці факти і масову еміграцію, з 2014 року у Латвії встановили обмеження на купівлю сільськогосподарських земель. Було спрощено продаж землі місцевим жителям, а також заборонено купівлю іноземцям, які не перебувають у країні; особа повинна володіти латвійською мовою і подати подальший план використання земельних ділянок. На сьогодні в одні руки можна купити 2 000 га. Із впровадженням цих правил ринок землі знову зріс, і тепер середня вартість 1 га становить 4 818 євро [3; 4].

Кожна країна сама репрезентує свої обмеження і ставить власні умови, але в усіх є спільна риса: у жодній з перелічених країн немає обмежень у цінах на землю. Найвищий середньорічний темп зростання цін зафіксований у Румунії – близько 40 %, а найвища ціна на землю серед країн Центральної та Східної Європи – у Польщі – 8 500 дол. за 1 га [5].

Проаналізувавши динаміку формування мінімальних і максимальних цін на сільськогосподарські землі в Європі, з'ясували, що найменша вартість земель сільськогосподарського призначення з показником у межах мінімальних цін у Болгарії, Швеції – 1,6 тис. дол./га, та Румунії – 1,9 тис. дол./га, а найбільша – у Нідерландах – 54,2 тис. дол./га, Люксембургу – 35,6 тис. дол./га, Ірландії – 19,9 тис. дол./га. Найменша вартість земель сільськогосподарського призначення із показником у межах максимальних цін у Румунії – 2,3 тис. дол./га, Латвії та Естонії – по 2,9 тис. дол./га, а найбільша – у Нідерландах – 116,1 тис. дол./га, Італії – 57,0 тис. дол./га та Греції – 55,5 тис. дол./га [4; 5].

Отже, у більшості країн світу велика частина сільськогосподарських земель перебуває у приватній власності. У країнах, де ця частка перевищує 70 %, уряд чітко розподілив землю між місцевими фермерами та великими агропромисловими компаніями, і для іноземних громадян практично немає обмежень щодо придбання земельних ділянок. Цей високий рівень приватної власності характерний для країн із розвиненим та ефективним сільськогосподарським сектором.

Також з'ясовано, що у формуванні ціни на землю в Європі важливу роль відіграють такі фактори: якість ґрунтів, наявність інфраструктури навколо ділянки, загальнополітична ситуація, умови для бізнесу, відсутність обтяжень на земельну ділянку та доступність кредитів. У країнах із доступними кредитними умовами ціни на землю значно вищі, що дає можливість фермерам отримувати фінансування для розвитку виробництва. Одночасно існують

чинники, що зумовлюють зниження цін, такі як обмежений доступ до кредитних ресурсів, ускладнені процедури купівлі землі, високі податки та корупція.

Висновки.

Аналіз світового досвіду щодо формування ринку земель – одна з ключових цілей економічного зростання. У цьому процесі держава відіграє важливу роль, визначаючи нормативно-правове середовище для земель сільськогосподарського призначення відповідно до ринкових умов, регулюючи оподаткування та збори під час земельних операцій, проводячи інвентаризацію та планування території, забезпечуючи

контроль за якістю ґрунтів та розвиток інших галузей інфраструктури, надаючи консультації громадянам щодо використання земель та унеможливаючи недозволене передавання земель лісогосподарського та водного фонду.

Важливе стратегічне завдання України полягає у створенні умов для дотримання всіх прав людини, включаючи право на вільне володіння, користування та розпорядження власним майном. Упровадження вільного ринку земель в Україні має потенціал сприяти появі свободи вибору, нових можливостей та перспектив розвитку як у сільському господарстві, так і в економіці загалом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України від 28 черв. 1996р. з наст. змінами і допов. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi>
2. Проніна О. В. Іноземний досвід державного управління ринком землі. URL: http://pa.stateandregions.zp.ua/archive/1_2017/17.pdf
3. Створення вільного ринку землі сільськогосподарського призначення в Україні. URL: https://www.slideshare.net/Easy_Business/ss-84109781
4. Real estate market report, 2020. Baltic states capitals. Vilnius, Riga, Tallinn. URL: <https://www.oberhaus.lt/wp-content/uploads/Ober-Haus-Market-Report-Baltic-States2020>
5. Ciaian P., Kancs D. A., Swinnen J. F., Van Herck K., Vranken L. Institutional factors affecting agricultural land markets. Brussels: Centre for European Policy Studies. Functioning of land markets states under the influence of measures applied under the CAP. URL: https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/commonagricultural-policy/cmef/products-and-markets/functioning-land-markets-states-under-influencemeasures-applied-under-cap_en

REFERENCES

1. *Konstytutsiya Ukrayiny vid 28 cherv. 1996r. z nast. zminamy i dopov.* [Constitution of Ukraine dated June 28, 1996, with subsequent amendments and additions]. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi> (in Ukrainian).
2. Pronina O. *Inozemnyy dosvid derzhavnoho upravlinnya rynkom zemli* [Foreign experience in state land management]. URL: http://pa.stateandregions.zp.ua/archive/1_2017/17.pdf (in Ukrainian).
3. *Stvorennya vil'noho rynku zemli sil's'kohospodars'koho pryznachennya v Ukrayini* [Establishment of a free market for agricultural land in Ukraine]. URL: https://www.slideshare.net/Easy_Business/ss-84109781 (in Ukrainian).
4. Real estate market report, 2020. Baltic states capitals. Vilnius, Riga, Tallinn. URL: <https://www.oberhaus.lt/wp-content/uploads/Ober-Haus-Market-Report-Baltic-States2020>
5. Ciaian P., Kancs D.A., Swinnen J.F., Van Herck K. and Vranken L. Institutional factors affecting agricultural land markets. Brussels: Centre for European Policy Studies. Functioning of land markets states under the influence of measures applied under the CAP. URL: https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/commonagricultural-policy/cmef/products-and-markets/functioning-land-markets-states-under-influencemeasures-applied-under-cap_en

Надійшла до редакції: 12.03.2024.

УДК 711.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.135.1066

ФОРМУВАННЯ АРХІТЕКТУРНО-МІСТОБУДІВНОГО ПРОСТОРУ СТАРИЦЬ: НАУКОВИЙ ТА ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД

САМОЙЛЕНКО Є. В.^{1*}, канд. арх., доц.,
СІРИК Б. Д.², студ.

^{1*} Кафедра архітектурного проектування та містобудування, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 156-31-57, e-mail: JSamoilik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2813-4767

² Кафедра архітектурного проектування та містобудування, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 294-40-59, e-mail: siric.boris@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-3675-5279

Анотація. Постановка проблеми. Після прийняття Закону № 1641-VIII від 04.10.2016 р. в українське законодавство введено «басейновий принцип управління». Цей принцип передбачає комплексне (інтегроване) управління водними ресурсами в межах району річкового басейну [1]. У долинах рівнинних річок із великою кількістю вигинів, зокрема, у Дніпра, Дунаю, Вісли, формуються стариці, тобто залишки старого річища. Стариці – це малі озера, що утворюються на заплавах унаслідок ерозії та випадання осаду. У великих містах подібні озера стають важливими осередками біологічної різноманітності, поліпшують мікроклімат, становлять перешкоду паводкам та мають привабливий зовнішній вигляд. Однак, стариці схильні до висихання, замулення та перетворення на болота. Отже, дослідження стариць у контексті містобудування вкрай необхідне для запобігання хаотичній забудові й збереження подібних екосистем. Крім того, узагальнення досвіду освоєння та реабілітації таких об'єктів має практичне значення для міського планування. **Мета дослідження.** Розглянути та узагальнити науковий і практичний досвід формування архітектурно-містобудівного простору вдовж стариць. **Висновок.** Знайдено та систематизовано наукові дослідження у галузях гідротехніки, агрономії, урбаністики, які можна впровадити в містобудівну практику для розв'язання проблем стариць. За допомогою супутникових знімків, аналітичних карт-схем виявлено закономірності в організації простору стариць у найбільших містах України. Аналогічно знайдено та проаналізовано закордонні приклади планування і забудови приозерних (пристаричних) територій в Європі, Америці, Азії, Океанії. У вищезгаданих прикладах виявлено вдалі практичні рішення використання науково-технічних методів збереження стариць. Виявлено закономірності й тенденції організації забудови та вуличної мережі навколо малих заплавлених озер і стариць.

Ключові слова: міський простір; урбаністика; прибережні території; озера; науковий досвід, практичний досвід; стариці; старичні озера

FORMATION OF THE ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING SPACE OF OXBOW LAKES: SCIENTIFIC AND PRACTICAL EXPERIENCE

SAMOILENKO Ye.V.^{1*}, Cand. Sc. (Arch.),
SIRYK B.D.², Stud.

^{1*} Department of Architectural Design and Urban Planning, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 156-31-57, e-mail: JSamoilik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2813-4767

² Department of Architectural Design and Urban Planning, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 294-40-59, e-mail: siric.boris@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-3675-5279

Abstract. Problem statement. Following the adoption of Law No. 1641-VIII on October 4, 2016, the Ukrainian legislation introduced the “basin management principle”. This principle entails comprehensive (integrated) management of water resources within the river basin area [1]. In the valleys of lowland rivers with numerous bends, particularly in the Dnipro, Danube, and Vistula rivers, oxbow lakes are formed, representing remnants of old river channels. Oxbow lakes are small lakes that form on floodplains due to erosion and sediment deposition. In large cities, such lakes are important centers of biological diversity, improve microclimate, act as barriers to floods, and have an attractive

appearance. However, oxbow lakes are susceptible to drying up, silting, and turning into marshes. Therefore, research on oxbow lakes in the context of urban planning is highly necessary to prevent chaotic development and preserve similar ecosystems. Additionally, the consolidation of experience in the development and rehabilitation of such objects is practically significant for urban planning. **Research objective.** The purpose is to examine and summarize the scientific and practical experience in forming the architectural and urban planning space along oxbow lakes. **Conclusion.** Scientific research in the fields of hydraulic engineering, agronomy, and urban planning that can be implemented in urban planning practice to address oxbow lake issues has been identified and systematized. Using satellite imagery and analytical maps, patterns in the organization of oxbow lake spaces in the largest cities of Ukraine have been identified. Similarly, examples of planning and development of lakeside (old riverbed) territories in Europe, America, Asia, and Oceania have been found and analyzed. Successful practical solutions for the use of scientific and technical methods for preserving oxbow lakes have been identified in the aforementioned examples. Patterns and trends in organizing development and street networks around small floodplain lakes and oxbow lakes have been revealed.

Keywords: *urban space; urban studies; coastal areas; lakes; scientific experience; practical experience; oxbows; oxbow lakes*

Аналіз публікацій. Серед досліджень, що стосуються освоєння стариць і приозерних територій, можна виокремити три основні напрями.

Техноекологічний підхід – вирішує питання впливу господарської діяльності людини на довкілля, окремо досліджує екологію промисловості, екологію сільського господарства, екологію будівництва.

Методи: регулювання господарської діяльності, створення захисних зон, заходи з очищення ґрунтів та стічних вод (за матеріалами А. В. В'язовської, G. Haidvogel, J. L. Rasmusen, Andreea-Gabriela Zamfir, Julien P. Y., Shah-Fairbank S. C., Kim J.) [2; 6].

Функціонально-просторовий підхід – рішення проблем організації простору засобами архітектури та містобудування. Враховує композиційні, історико-культурні, економічні, соціальні, кліматичні, ландшафтні та екологічні чинники.

Методи: водозахисні функції пристаричних територій, просторово-тематичні трансформації прибережних зон, гуманізація середовища, формування рекреаційної системи міста (за матеріалами В. М. Вадімова, Н. Е. Штомпель, І. О. Мерілової, Л. І. Рубан, В. Т. Семенов) [3–5].

Гідрологічний підхід – полягає в дослідженні басейну річки, її приток, заплав і стариць, враховує фактори, які впливають на показники якості води, зміни річища ріки або форми озера.

Методи: аналіз форми водойми, дослідження кутів біфуркації водотоків, методи відновлення проточності, дослідження басейну річки, приток та стариць як єдиної системи (за матеріалами: Solarek K, Susanne Muhar, Jan Sendzimir) [7; 8]

Окремо слід розглянути способи відновлення занедбаних річищ та стариць (табл. 1) за матеріалами дослідників Колорадського університету. Автори звіту описали процес формування стариць унаслідок ерозії ґрунтів та господарської діяльності. До чинників, що зумовлюють деградацію стариць, належать: забруднення ґрунтів, утворення осаду, зниження швидкості течії, зменшення кількості кисню у воді.

Дослідники зазначають, що ефективними методами збереження та відновлення старих річищ виступають повернення проточності, поглиблення дна, укріплення берегів зеленими насадженнями, формування прибережних захисних смуг та зелених санітарно-захисних зон [6]. Західноєвропейські гідрогеологи Susanne Muhar, Jan Sendzimir, Mathias Jungwirth та Severin Hohensinner у своїй публікації про відновлення басейну річки також зазначають, що днопоглиблення та відновлення проточності між старицями та річками показують свою ефективність у зменшенні кількості осаду.

Слід зауважити, що якщо річка неглибока і течія повільна, відведення води в старицю може значно зменшити рівень

води в основному річищі. [7]. Крім того, в експериментальному дослідженні з гідравліки вчені Інституту науки і технологій ParisTech довели, що висота

осаду та час, за який осад перекриває протік між новим та колишнім річищем, залежить від кута біфуркації, тобто геометрії річища.

Таблиця 1

Засоби збереження і відновлення стариць

Напрямок	Засіб	Корисний ефект
Біологічне очищення	Болотні екопарки і бульвари	Поліпшення якості води Відновлення біорізноманіття
	Фіторемидація	Очищення ґрунтів і поверхневих стоків
Контроль якості води (BMPs)	Укріплення кромки поля	Зменшення седиментації
	Прибережні захисні смуги	Зменшення седиментації, азоту і фосфору, ерозії
	Укріплення берегів	Зменшення седиментації
Гідротехніка	Влаштування водозливів	Управління водними потоками Поліпшення якості води
	Греблі і ворота	Управління водними потоками Поліпшення якості води
	Насоси для відведення потоку	Поліпшення якості води
	Днопоглиблення	Очищення від мулу, осаду Доступ до підземних вод
	Скидання води з ГЕС	Збільшує глибину водотоку
	Шлюзи і дамби	Контроль рівня води в річищі

Кут біфуркації – це кут між осями потоків у місці, де потік річки розділяється на основний потік та рукав. Експеримент проведено на моделі штучного каналу, в який поступово скидали річковий пісок. Дослід довів, що коли розгалуження під гострим кутом – 30° і менше, час, за який осад перекриває відгалужений потік, буде найдовшим. Коли розгалуження має симетричну форму, а гілки потоків розташовані під гострим кутом, осад практично не утворюється [9].

Аналіз практичного досвіду. Сучасні містобудівники фіксують дві проблеми. Перша – відсутність цільових орієнтирів, коли неможливо передбачити майбутній розвиток. Друга проблема – складність реалізації проєктів через конфлікт приватних та громадських інтересів. Чинна на сьогодні вітчизняна нормативно-правова база в цілому являє собою спадщину соціалістичного періоду. Отже, модель сучасного генерального плану повинна передбачати можливість оперативного внесення змін та прийняття реалістичних, короткострокових проєктних рішень [5].

Для аналізу вітчизняного досвіду формування простору стариць обрано ділянку у містах із населенням понад 250 тисяч осіб, наявністю озер, забудови та

транспортного зв'язку з іншими районами міста. Оцінювали територію графоаналітичним методом за допомогою супутникових знімків. Результатом стали принципові схеми районів та висновки про способи організації простору (табл. 2).






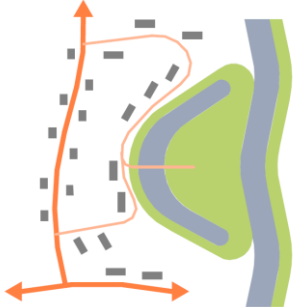




У більшості випадків старі підходи до проєктування ігнорували особливості стариць. Наземні протоки засипані та перекриті транспортними шляхами, на прибережній території розміщені садибні ділянки, автостоянки, гаражні. Невпорядковане планування вулиць та городи на садибних ділянках, недостатня кількість зелених насаджень уздовж берегів не дають поверхневим водам очиститися перед стіканням в озера, а також прискорює ерозію ґрунтів.

Серед вдалих рішень, що зберігають стариці та інтегрують їх у міське середовище, можна виділити декілька прийомів. Організація громадської забудови й озеленення між озерами та вулицями, влаштування закритих протоків між озерами (Київ, Оболонь. Вінниця, Вишенське озеро). Збереження заплавної території між старицею та річкою, організації там парку (Харків, Мирський гай). Збереження ландшафту вздовж усіх берегів стариць, розміщення там рекреаційних об'єктів

(Суми, озеро Чеха; Кривий Ріг, Покровський район).











Таблиця 2

Приклади з вітчизняного практичного досвіду


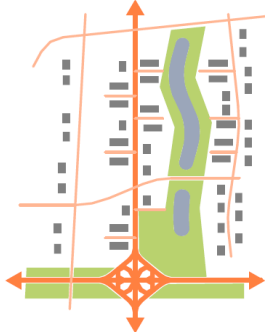



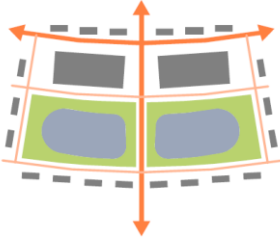

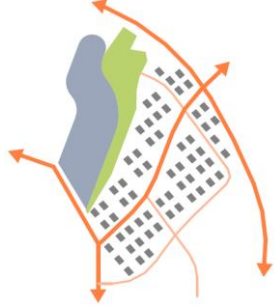


Місто, район	План	Принципова схема
Київ, Оболонський проспект		
Вінниця, Вишенське озеро		
Харків, Мирський Гай		
Суми, озеро Чеха		
Кривий Ріг, Покровський район		

Таблиця 3

Приклади з закордонного практичного досвіду

Місто, район	План	Піктограма
Відень, Зеештадт Асперн		
Варшава, Гоцлав		
Прага, Дзбан		
Бухарест, Доброешть		
Лондон, Вудбері-Даун		

Продовження таблиці 3

Місто, район	План	Принципова схема
Вінніпег, Форт Річмонд		
Іган, озеро Лімай		
Сеул, Сокчхон		
Мілуо, Дуан Ву		
Гамільтон, Ті Ава Лейкс		

Для аналізу зарубіжної практики відібрано десять прикладів із різних частин світу: Європа, Азія, Америка, Океанія. Аналітичні схеми розроблені так само, як і для вітчизняних прикладів. Але, у закордонних містах виявлено більше вдалих прикладів благоустрою прибережних зон та організації забудови. Проте у прикладах із Румунії та Китаю ці проблеми проігноровані (табл. 3).

Вдалим рішенням організації багатопверхової забудови стало таке розміщення будинків, коли до озера виходять відкриті подвір'я, відведені під озеленення та рекреаційні об'єкти. Самі озера у цьому випадку поєднані з каналами, що ведуть до більш значних водойм (Варшава, Гоцлав; Прага, Дзбан; Лондон, Вудбері-Даун; Вінніпег, Форт Річмонд). За наявності громадського центру району його розміщують біля магістральної вулиці, що проходить між старицями або над каналом (Відень, Зеештадт; Сеул, Сокчхон).

Однак, американський досвід демонструє, що біля великих озер краще розміщувати малоповерхову садибну забудову, а великі громадські будинки – біля малих озер, тому що це спрощує розміщення будівель. Досвід австрійського району Зеештадт показує, що периметральна забудова працює лише коли вона відділена від озера набережною або прибережним парком.

Часто закордонні містопланувальники влаштовують систему пов'язаних пішохідних або озелених просторів, що ведуть до прибережної зони (Відень; Гамільтон).

Можна виділити деякі прийоми та узагальнити їх. Перша група прийомів пов'язана із захистом прибережної зони та очищенням води, що стікає в озеро. Автошляхи та магістралі відокремлюються від озера прибережним парком, або у вигляді мостів, перпендикулярних до озера. Поверхневі стоки повинні затримуватися зливовими бульварами, штучними болотами, терасами та захисними смугами озеленення. Сади та городи організуються

на ділянках відокремлених вулицями та забудовою.

Друга група передбачає вдосконалення функціональної та композиційної компоненти. Мета – формування безбар'єрного та функціонального середовища. До таких прийомів належать перпендикулярні пішохідні зв'язки з озером, терасовані озеленені набережні та прибережні парки.

Якщо влаштування парків недоцільне, забудова організована так, щоб до води був доступ із відкритих дворів будинків. Але такі подвір'я є частиною системи озеленення та мають пріоритет для пішоходів. Крім того, великі будинки мають тераси, орієнтовані в бік води, або забудова організована так, що ближче до води поверховість зменшується.

До останньої, третьої групи належать способи, пов'язані з гідротехнічними спорудами та підготовчими роботами. Використання підземних джерел, відновлення зв'язків стариць із рікою, мережа каналів, природні дренажі показують ефективність у розв'язанні проблем стариць.

У цілому, можна дійти висновку, що як закордонні, так і вітчизняні містопланувальники стикаються з аналогічними проблемами, пов'язаними зі старицями. Можна знайти вдалі приклади збереження стариць та розвитку території навколо них, але більшість практиків ігнорує проблеми подібних водних об'єктів.

Висновки.

У результаті аналізу наукових досліджень виявлено найефективніші підходи до освоєння стариць: відновлення проточності, поглиблення дна, прибережні захисні смуги, очищення та укріплення ґрунтів прибережної зони [6]. Крім того, сучасні підходи містобудування та урбаністики передбачають гуманізацію прибережного простору, розвиток системи рекреаційних зон, захист прибережних територій.

У сучасному інформаційному суспільстві стариці залишаються важливим водно-зеленим компонентом міста, який має

значення для оздоровлення населення та створення привабливого, комфортного середовища. Узагальнення та систематизація підходів до роботи з прибережним простором стариць може вдосконалити практику забудови і планування подібних територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом : Закон України від 04.10.2016 р. № 1641-VIII.
2. В'язовська А. В. Методичні засади планувальної організації водно-зелених територій міста : автореф. дис. Київ, 2019. 22 с.
3. Вадімов В., Мерилова І., Самойленко Є. Стратегія розвитку прибережних територій великого міста. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2021. № 59. С. 172–188.
4. Рубан Л. І. Архітектурно-ландшафтна організація прибережних територій: інформаційно-цифровий модуль (рівень та контроль). *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2017. № 48. С. 250–259.
5. Семенов В. Т., Штомпель Н. Е. Сталий розвиток мегаполісів : монографія. Рецензент: Ю. М. Шкодовський, Є. Є. Ключниченко. Харків : ХНУМГ, 2014. 339 с.
6. Julien P. Y., Shah-Fairbank S. C., Kim J. Restoration of Abandoned Channels Report prepared. Fort Collins : Colorado State University, 2008. 38 p.
7. Muhar S. et al. Restoration in Integrated River Basin Management. *Riverine Ecosystem Management* : ed. by S. Schmutz, J. Sendzimir. Лондон, 2018. Vol. 8 : Riverine Ecosystem Management. Pp. 282–287.
8. Solarek K. The reactivation of Warsaw oxbow lakes as a leitmotiv of urban design. *Journal of Water and Land Development*. 2020. Vol. IV–VI, № 45. Pp. 165–170.
9. Szewczyk L., Grimaud J.-L., Cojan I. Experimental evidence for bifurcation angles control on abandoned channel fill geometry. *Earth Surface Dynamics*. 2020. № 8. Pp. 275–288.

REFERENCES

1. *Pro vnesennya zmin do deyakykh zakonodavchykh aktiv Ukrayiny shchodo vprovadzhennya intehrovanykh pidkhdov v upravlinni vodnyimi resursamy za baseynovym pryntsypom* [On the introduction of changes to some legislative acts of Ukraine regarding the implementation of integrated approaches in the management of water resources according to the basin principle]. *Zakon Ukrayiny vid 04.10.2016 № 1641-VIII* [Law of Ukraine of 04.10.2016 no. 1641-VIII]. (in Ukrainian).
2. Viazovska A.V. *Metodychni zasady planuval'noyi orhanizatsiyi vodno-zelenykh terytoriy mista : avtoreferat dysertatsiyi* [Methodical Principles of the Planning Organization of Urban Blue-Green Territories : extended abstract of dissertation of Candidate of Architecture : 18.00.04]. Kyiv, 2019. 22 p. (in Ukrainian).
3. Vadimov V., Merylova I. and Somoylenko Ye. *Stratehiya rozvytku pryberezhnykh terytoriy velykoho mista* [Strategy for the development of the urban waterfront areas]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya* [Contemporary Problems of Architecture and Urban Planning]. 2021, no. 59, pp. 172–188. (in Ukrainian).
4. Riban L.I. *Arkhitekturno-landshafna orhanizatsiya pryberezhnykh terytoriy : informatsiyno-tsyfrovyi modul' (riven' ta kontrol')* [The architectural & landscape organization of urban waterfronts : the informational-digital module (level & control)]. *Suchasni problemy Arkhitektury ta Mistobuduvannya* [Contemporary Problems of Architecture and Urban Planning]. 2017, no. 48, pp. 250–259. (in Ukrainian).
5. Semenov V.T. and Shtompel N.E. *Stalyi rozvytok mehapolisiv : monohrafiya* [Sustainable development of megacities : monograph]. Reviewer : Yu.M. Shkodovskyi and E.Ye. Klyushnichenko. Kharkiv : KNAME Publ., 2014, 339 p. (in Ukrainian).
6. Julien P.Y., Shah-Fairbank S.C. and Kim J. Restoration of Abandoned Channels Report prepared. Fort Collins: Colorado State University, 2008, 38 p.
7. Muhar S. et al. Restoration in Integrated River Basin Management. *Riverine Ecosystem Management* : ed. by S. Schmutz, J. Sendzimir. 2018, vol. 8 : Riverine Ecosystem Management, pp. 282–287.
8. Solarek K. The reactivation of Warsaw oxbow lakes as a leitmotiv of urban design. *Journal of Water and Land Development*. 2020, vol. IV–VI, no. 45, pp. 165–170.
9. Szewczyk L., Grimaud J.-L. and Cojan I. Experimental evidence for bifurcation angles control on abandoned channel fill geometry. *Earth Surface Dynamics*. 2020, no. 8, pp. 275–288.

Надійшла до редакції: 01.04.2024.

УДК 621.6+519.8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.143.1067

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРУПОВОГО ВРАХУВАННЯ АРГУМЕНТІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ГАЗУ НАСЕЛЕННЯМ

ТКАЧОВА В. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

БЕРЕЗЮК Г. Г.², ст. викл.,

ПРОКОФ'ЄВА Г. Я.³, канд. техн. наук, доц.,

СОЛОД Л. В.⁴, канд. техн. наук, доц.,

АДЕГОВ О. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 152-25-06, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

² Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 501-93-84, e-mail: berezuiik.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

³ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 284-34-87, e-mail: chornomorets.halina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

⁴ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 681-12-02, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

⁵ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 505-51-51, e-mail: adehov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Анотація. Постановка проблеми. Серед найважливіших завдань оптимізації режимів роботи міських газорозподільчих систем – розроблення найближчої стратегії таких режимів. Обробка планових і статистичних показників режимів газоспоживання – один із ключових методів забезпечення оптимального функціонування та нормальної експлуатації систем газопостачання. Найбільш перспективним методом моделювання для розв'язання задач прогнозування став метод самоорганізації моделей, реалізований як метод групового урахування аргументів (МГУА). Короткострокове прогнозування обсягу газоспоживання становить основну вихідну інформацію для прийняття рішень у процесі планування режимів споживання й оперативно-диспетчерського управління. Метод МГУА, відомий також як метод Івахненко, – це потужний інструмент для отримання високоточних прогностичних моделей, що набуває значущості для прогнозування у керуванні енергетичними ресурсами та плануванні їх використання. Розв'язання подібної задачі актуальне, оскільки надає можливість аналізувати обсяги споживання природного газу населенням на майбутній період. **Мета статті** – методом групового урахування аргументів за вхідними даними побудувати математичні моделі прогнозування споживання газу. **Висновок.** Для вибору кращих моделей рекомендуються такі параметри: витрата газу завтрашнього дня як функція (основний критерій) та аргументи (додатковий критерій) – витрата газу на сьогоднішній день, температура повітря на сьогодні, температура вчорашнього дня і температури за минулі 3, 5, 7 днів, швидкість вітру і день тижня. Отримані математичні моделі споживання природного газу населенням можна буде застосувати для аналізу обсягів споживання природного газу. Метод дозволяє знайти єдину оптимальну математичну модель, яка найкращим чином розв'язує поставлену задачу.

Ключові слова: метод групового урахування аргументів; короткострокове прогнозування; споживання природного газу; прогностична модель

APPLICATION OF THE METHOD OF GROUP ARGUMENTS ACCOUNTING FOR BUILDING MODELS OF SHORT-TERM FORECASTING OF GAS CONSUMPTION BY THE POPULATION

TKACHOVA V.V.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

BEREZIUK H.H.², Sen. Lect.,

PROKOFIEVA H.Ya.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SOLOD L.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ADEHOV O.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 152-25-06, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

² Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 501-93-84, e-mail: berezuiik.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

³ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 284-34-87, e-mail: chornomorets.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

⁴ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 681-12-02, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

⁵ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 505-51-51, e-mail: adehov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Abstract. Problem statement. One of the most important tasks in optimizing the operation modes of urban gas distribution systems is to develop a short-term strategy for such modes. Processing of planned and statistical indicators of gas consumption modes is one of the key methods for ensuring the optimal functioning and normal operation of gas supply systems. The most promising modeling method for solving forecasting problems is the method of self-organization of models implemented as the method of group arguments accounting (MGAA). Short-term forecasting of gas consumption is the main source of information for decision-making in the process of planning consumption regimes and operational dispatch control. The MGAA method, also known as the Ivakhnenko method, is a powerful tool for obtaining highly accurate forecasting models and is gaining importance for forecasting in energy resource management and planning their use. The solution to such a problem is relevant, as it makes it possible to analyze the volume of natural gas consumption by the population for the future period. *The purpose of the article* is to build mathematical models for forecasting gas consumption using the method of group arguments accounting based on input data. **Conclusion.** To select the best models the following parameters are recommended: tomorrow's gas consumption as a function (main criterion) and arguments (additional criterion) - gas consumption to date, air temperature to date, yesterday's temperature and temperatures for the past 3, 5, 7 days, wind speed and day of the week. The resulting mathematical models of natural gas consumption by the population can be used to analyze the volume of natural gas consumption. The method allows us to find a single optimal mathematical model that best solves the problem.

Keywords: *method of group arguments accounting; short-term forecasting; natural gas consumption; prognostic model*

Постановка проблеми. Наразі особливо актуальними для сегмента газорозподілу стали питання забезпечення роботоздатності трубопроводів і обладнання газорозподільних мереж в умовах обмеженого постачання газу споживачам внаслідок можливого руйнування обладнання.

Своєчасне отримання інформації про майбутній обсяг газоспоживання має велике значення для оцінювання надійності та граничних режимів, а також для досягнення оптимального режиму в системі транспорту та розподілу газу. Точність короткострокового прогнозу обсягу споживаного газу суттєво впливає на ефективність роботи газотранспортних

систем. Недооцінка навантаження може спричинити зростання використання пікового обсягу, що, у свою чергу, викличе зниження резервів, а завищений прогноз навантаження може спонукати необґрунтоване збільшення резерву, і, отже, собівартості газу. Тому дуже важливим фактором бачиться якість оперативного прогнозування навантаження мережі.

Аналіз публікацій. Для прогнозування обсягів споживання природного газу широко застосовують математичні методи: нейронні мережі, нейро-нечіткі технології моделювання, еволюційні алгоритми, часові ряди, статистичні методи (методи кореляційного, регресійного та дисперсійного аналізів) та інші.

Застосування методу прогнозування споживання газу, що поєднує генетичні алгоритми та авторегресійне переміщення, міститься в дослідженні [1].

Прогнозування групового споживання газу в побутовому секторі, у місті чи районі розглянуте в працях [2–4].

У статті [5] висвітлено метод прогнозування споживання природного газу індивідуальними абонентами в опалювальний сезон.

Для створення математичної моделі короткострокового прогнозування споживання газу потрібно визначити її структуру та оцінити параметри за допомогою статистичних або експериментальних даних. Складність моделювання споживання природного газу визначається необхідністю врахування багатьох факторів. Для розв'язання таких задач пошук оптимальних параметрів можливо реалізовувати за допомогою еволюційних методів [6–9].

Відомо, що на величину обсягу споживаного газу впливають такі фактори як ступінь охоплення і структура споживачів, виробнича та побутова активність населення, метеорологічні чинники тощо. Саме обмеження в доступі до загальної інформації потребують застосування спеціалізованих методів, спрямованих на розв'язання задач в саме таких умовах. Метод самоорганізації, який заснував видатний український вчений в галузі автоматичного управління, кібернетики та інформатики Олексій

Григорович Івахненко, являє собою спробу різкого підвищення точності математичного моделювання, при короткому періоді спостереження процесу [10–12].

Мета дослідження – побудова математичних моделей з урахуванням числа факторів (обсягу споживання природного газу населенням і кліматичних даних) за допомогою методу групового урахування аргументів (МГУА) для прогнозування споживання природного газу населенням.

Виклад матеріалу. Для вибору кращих моделей методом самоорганізації обрано такі параметри: витрата газу завтрашнього дня як функція (основний критерій) та аргументи (додатковий критерій) – витрата газу на сьогоднішній день, температура повітря на сьогодні, температура вчорашнього дня і температури за минулі 3, 5, 7 днів, швидкість вітру і день тижня (табл. 1).

Використовуючи дані параметри, будують варіанти моделей для деяких або всіх аргументів. Для кожної моделі визначають її змінні (A_1, A_2, A_3). Серед усіх моделей вибирають кілька найкращих. При першому відборі змінних навчальної послідовності, взятої з перших 16 точок, у процесі пошуку відібрано 21 залежність, яка складається з кращих пар аргументів (табл. 2). У процесі пошуку рішень кількість похибок зменшується з кожною ітерацією. В першій парі змінних дуже велика неузгодженість, яка з кожною новою парою наближається до мінімуму.

Таблиця 1

Вихідні дані газоспоживання за листопад, м. Дніпро

Дні листопада	f	1	2	3	4	5	6	7	8
	$V_{\text{прогн.}}$ тис.м.куб.	$V_{\text{факт. (насел.)}}$ тис.м.куб.	$t, ^\circ\text{C}$	$t_{-1}, ^\circ\text{C}$	$t_{-3}, ^\circ\text{C}$	$t_{-5}, ^\circ\text{C}$	$t_{-7}, ^\circ\text{C}$	$W, \text{M}/\text{C}$	День тижня
1	1 701,119	1 638,294	4,4	5,9	5,6	4,0	2,4	6	Сб
2	1 692,142	1 701,119	1,8	4,4	5,5	4,8	3,3	6	Нд
3	1 602,063	1 692,142	-0,7	1,8	4,0	4,6	3,7	3	Пн
28	1 901,310	1 920,973	-2,5	-4,2	-4,0	-4,4	-3,8	2	Пт
29	2 065,619	1 901,310	-1,6	-2,5	-3,7	-3,6	-4,2	5	Сб
30	2 374,495	2 065,619	-4,6	-1,6	-2,8	-3,2	-3,7	5	Нд

Таблиця 2

Значення змінних на навчальній послідовності 1-го ряду селекції

№	Аргумент	Цільова функція E1	Змінна A1	Змінна A2	Змінна A3
1	1,2	0,0415	1,889	-1,367	2,135
2	1,3	0,0267	1,036	0,015	0,540
3	1,4	0,0269	0,905	0,149	0,439
4	1,5	0,0230	0,688	0,290	0,441
5	1,6	0,0204	0,721	0,312	0,369
18	4,7	0,0270	0,912	0,290	0,059
19	5,6	0,0322	1,200	0,176	0,115
20	5,7	0,0277	1,075	0,043	0,058
21	6,7	0,0255	0,881	0,338	0,058

За підсумками зіставлення результатів перевіркої та навчальної послідовностей (табл. 2) отримані найкращі значення змінних: $A1 = 0,688$; $A2 = 0,290$; $A3 = 0,441$.

Розрахунок прогнозованих витрат газу проведений за формулою:

$$V = A1 + A2 \cdot X1 + A3 \cdot X2,$$

де $X1$ – фактичні витрати газу, $X2$ – безрозмірний комплекс температури F .

$$V_1 = 0,688 + 0,290 \cdot 1,638\,294 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,488\,122 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_2 = 0,688 + 0,290 \cdot 1,701\,119 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,487\,819 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_3 = 0,688 + 0,290 \cdot 1,692\,142 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,489\,626 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{28} = 0,688 + 0,290 \cdot 1,920\,973 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,765\,021 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{29} = 0,688 + 0,290 \cdot 1,901\,310 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,740\,797 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{30} = 0,688 + 0,290 \cdot 2,065\,619 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,779\,186 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}}.$$

На кожній ітерації відбувається селекція найбільш перспективних сполучень змінних. У кожному ряду розглядаються всі комбінації змінних (тобто всі моделі даного рівня складності). Краща комбінація в ряду визначає умови переходу від поточного ряду до наступного. В інших варіантах методу в кожному ряду не тільки розглядається найкраща модель, а й відбираються найкращі поєднання змінних. Вони і задають моделі наступного ряду. Знайдені на наступному кроці моделі використовуються як аргументи для опорних функцій наступного етапу ітерації (перехід на 2-й пункт). Тобто вже знайдені моделі беруть участь у формуванні більш складних наступних 14 елементів.

У другому ряду розглядаються функції від усіх пар обраних змінних. Відбувається формування нових змінних із кращих змінних поточного ряду. На наступному етапі ітерації із загальної кількості змінних були взяті точки навчальної послідовності по всіх перевірних (табл. 3).

Таблиця 3

Значення критерію моделювання на перевірній послідовності 1-го ряду селекції

Порядковий номер моделі	Порядкові номери 2 аргументів	Значення цільової функції E2
1	1,2	0,250
2	1,3	0,157
3	1,4	0,143
19	5,6	0,286
20	5,7	0,332
21	6,7	0,234

При зіставленні результатів навчальної та перевірної послідовностей отримано найкращі поєднання параметрів. Розглянемо найбільш збіжні результати (табл. 4).

Таблиця 4

Результати вибору математичних моделей 1-го ряду селекції

Порядковий номер вибраних моделей	Аргументи	Порядковий номер розглянутих моделей
1	1,5	4
2	1,6	5
3	3,7	15
4	3,6	14
5	1,4	3
6	3,4	12
7	1,3	2

Оскільки в програмі аргументи були зведені до безрозмірного вигляду, проводимо розрахунок за формулою:

$$F = (18-F)/19, \text{ де } F = t,$$

де t – температура навколишнього середовища; F – безрозмірний комплекс температури.

Значення цільової функції E_1 на навчальній послідовності знаходимо за формулою:

$$E_1 = \frac{S_1}{n_0}, \text{ де } S_1 = \sum_1^{n_0} (V_{\text{рознр.}i} - V_{\text{факт.}i})^2,$$

де n_0 – кількість навчальних послідовностей.

Значення цільової функції E_2 на перевірній послідовності знаходимо за формулою:

$$E_2 = \frac{S_2}{n_n}, \text{ де } S_2 = \sum_1^{n_n} (V_{\text{рознр.}i} - V_{\text{факт.}i})^2,$$

де n_n – кількість перевірних послідовностей.

На підставі отриманих значень розрахунку будуюмо графічну залежність фактичних та прогнозованих витрат газу (рис. 1) і робимо висновок, що графічний прогноз недостатньо точний при відборі залежностей, які складаються з двох змінних. Тому розглянемо, який прогноз може дати сумісність трьох аргументів із чотирма змінними (табл. 5).

Таблиця 5

Значення змінних на навчальній послідовності 2-го ряду селекції

№	Аргумент	Цільова функція E1	Змінна A1	Змінна A2	Змінна A3	Змінна A4
1	1,2,3	0,0031	0,256	-2,171	-1,533	-0,009
2	1,2,4	0,0001	0,227	-5,853	-0,655	-0,092
34	4,6,7	$6,04 \cdot 10^{-5}$	0,049	0,032	-0,017	-0,004
35	5,6,7	0,023	0,036	0,031	-0,194	-0,004

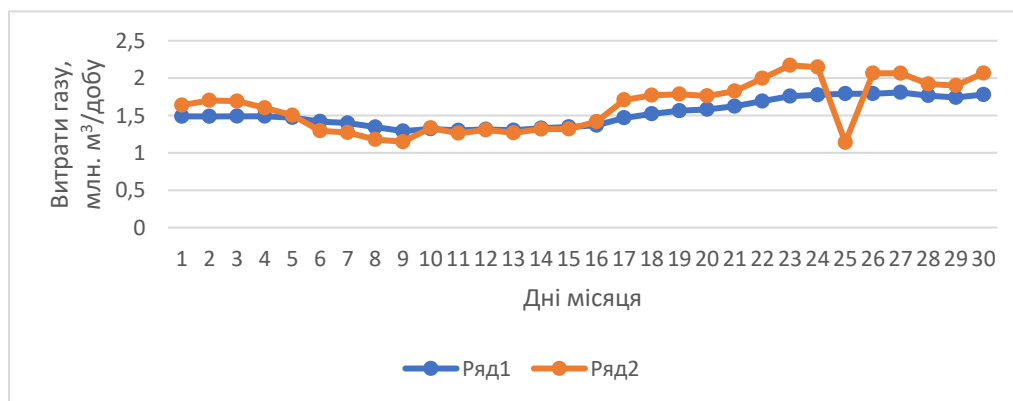


Рис. 1. Порівняння результатів прогнозованих і фактичних витрат газу з двома змінними аргументами: ряд 1 – прогнозовані витрати газу, млн м³/добу; ряд 2 – фактичні витрати газу, млн м³/добу

При першому відборі змінних навчальної послідовності в процесі пошуку було відібрано 35 залежностей, де із

загальної кількості змінних взято точки навчальної послідовності по всіх перевірних (табл. 6).

Таблиця 6

Значення критерію на перевірній послідовності 2-го ряду селекції

Порядковий номер моделі	Порядкові номери 3 аргументів	Значення цільової функції E2
1	1,2,3	0,038
2	1,2,4	0,00057
3	1,2,5	$6,53 \cdot 10^{-5}$
...
33	4,5,7	0,008
34	4,6,7	0,0003
35	5,6,7	0,011

При зіставленні результатів навчальної та перевірної послідовностей 2-го ряду селекції отримано найкращі поєднання параметрів (табл. 7). Основні ідеї методу: зменшити кількість моделей, розглянутих на кожному ряду, але при цьому не втратити

вдалого поєднання змінних, зменшити кількість рядів і тим самим прискорити вихід на оптимальний рівень складності.

Таблиця 7

Результати вибору математичних моделей 2-го ряду селекції

Порядковий номер вибраних моделей	Аргументи	Порядковий номер розглянутих моделей
1	1,6,7	15
2	1,4,6	11
3	1,4,7	12
4	1,5,6	13
5	1,5,7	14
6	1,2,5	3
7	1,2,7	5

Повторюємо розрахунок прогнозованих витрат газу:

$$V_1 = 0,005 + 1,058 \cdot 1,638\ 294 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 1,738\ 416 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_2 = 0,005 + 1,058 \cdot 1,701\ 119 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 1,805\ 382 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_3 = 0,005 + 1,058 \cdot 1,692\ 142 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 1,795\ 868 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{28} = 0,005 + 1,058 \cdot 1,920\ 973 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 2,038\ 252 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{29} = 0,005 + 1,058 \cdot 1,901\ 310 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 2,017\ 452 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{30} = 0,005 + 1,058 \cdot 2,065\ 619 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 2,191\ 272 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}}.$$

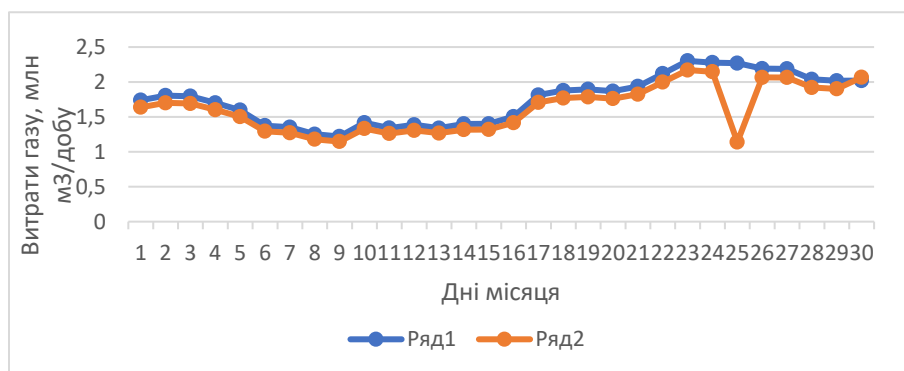


Рис. 2. Порівняння результатів прогнозованих і фактичних витрат газу з трьома змінними аргументами: ряд 1 – прогнозовані витрати газу, млн м³/добу; ряд 2 – фактичні витрати газу, млн м³/добу

Графік (рис. 2) більш точний і показує, що з кожним кроком ітерації зменшується середньоквадратичне відхилення (СКВ) (E1 та E2), але після досягнення певного рівня складності (залежить від характеру і

кількості даних, а також загального вигляду моделі) відхилення починає зростати. За даного поєднання параметрів ми справді можемо спрогнозувати витрати газу.

Висновки.

Виконані розрахунки підтверджують доцільність застосування методу. Отримані моделі можна буде застосувати для прогнозування обсягів споживання газу.

Поступово збільшуючи складність математичної моделі і задаючи ряд значень її коефіцієнтів із деяким невеликим кроком (у межах, допустимих обмеженнями), можливо організувати повний перебір всіх можливих

варіантів моделі за вказаним критерієм селекції і таким чином знайти найкращу (з переглянутих) модель.

При збільшенні складності математичної моделі точність, яка обумовлена на окремій перевірній послідовності, спочатку зростає, потім починає падати. Існування мінімуму критерію селекції є основою в теорії самоорганізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cayir Ervurala Beyzanur, Beycab Omer Faruk, Zaimc Selim. Model estimation of ARMA using genetic algorithms. *A case study of forecasting natural gas consumption : proceedings of the 12th International Strategic Management Conference*. Antalya, Turkey, October 28–30, 2016. ISMC. 2016. Pp. 537–545.
2. Павлов А. В., Степашко В. С., Кондрашова Н. В. Эффективные методы самоорганизации моделей. Киев: Академперіодика, 2014. 197 с.
3. Soldo B. Forecasting natural gas consumption. *Applied Energy*. 2012. Vol. 92. Pp. 26–37.
4. Brabec M., Konar O., Pelikan E., Maly M. A nonlinear mixed effects model for the prediction of natural gas consumption by individual customers. *International Journal of Forecasting*. 2008. Vol. 24, № 4. Pp. 659–678.
5. Панкевич В. В., Штовба С. Д. Прогнозування споживання природного газу індивідуальними абонентами в опалювальний сезон : *Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. Вінниця, 22–24 березня 2017 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/3160>
6. Irodov V. F., Barsuk R. V., Chornomorets H. Y. Multiobjective Optimization at Evolutionary Search with Binary Choice Relations. *Cybern Syst Anal*. Vol. 56. 2020. Pp. 449–454. ISSN: 10600396, URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00260-7>
7. Irodov Vyacheslav, Shaptala Maksym, Dudkin Kostiantyn, Shaptala Daria, Prokofieva Halyna. Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tubular heaters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 3/8 (111). Pp. 50–59. ISSN 1729-3774, UDC 621.1.016+519.816. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235837.
8. Irodov V. F., Khatskevych Yu. V. Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 98. С. 91–96.
9. Іродов В. Ф., Барсук Р. В. Загальна схема побудови алгоритмів самоорганізації моделей складних систем з використанням еволюційного пошуку рішень. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2015. Вып. 86. С. 43–49.
10. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев : Наукова думка, 1982. 296 с.
11. Irodov V. Self-organization methods for analysis of nonlinear systems with binary choice relations. *Journal Systems Analysis Modeling Simulation*. New-York, USA Inc: Gordon and Breach Science Publishers, 1995. Vol. 18–19. Pp. 203–206.
12. Иродов В. Ф. О построении и сходимости эволюционных алгоритмов самоорганизации и случайного поиска. *Автоматика*. 1987. № 4. С. 34–43.

REFERENCES

1. Cayir Ervurala Beyzanur, Beycab Omer Faruk and Zaimc Selim. Model estimation of ARMA using genetic algorithms. *A case study of forecasting natural gas consumption : Proceedings of the 12th International Strategic Management Conference*. Antalya, Turkey, October 28–30, 2016, ISMC, 2016, pp. 537–545.
2. Pavlov A.V., Stepashko V.S. and Kondrashova N.V. *Effektyvnye metody samoorghanyzatsyy modelej* [Effective methods for self-organization of models]. Kyiv : Akadempriodyka Publ., 2014. (in Russian).
3. Soldo B. Forecasting natural gas consumption. *Applied Energy*. 2012, vol. 92, pp. 26–37.
4. Brabec M., Konar O., Pelikan E. and Maly M. A nonlinear mixed effects model for the prediction of natural gas consumption by individual customers. *International Journal of Forecasting*. 2008, vol. 24, no. 4, pp. 659–678.
5. Pankevych V.V. *Prediction of natural gas consumption by individual subscribers in the heating season : materialy XLVI naukovo-tekhnichnoji konferenciji pidrozdiliv VNTU* [Prediction of natural gas consumption by individual subscribers in the heating season : materials of the XLVI scientific and technical conference of VNTU units]. Vinnitsa : VNTU Publ., 2017. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/3160.-> (in Ukrainian).

6. Irodov V.F., Barsuk R.V. and Chornomorets H.Y. Multiobjective Optimization at Evolutionary Search with Binary Choice Relations. *Cybern Syst Anal.* 2020, no. 56, pp. 449–454. ISSN: 10600396, URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00260-7>.
7. Irodov Vyacheslav, Shaptala Maksym, Dudkin Kostiantyn, Shaptala Daria and Prokofieva Halyna. Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tubular heaters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021, no. 3/8 (111), pp. 50–59. ISSN 1729-3774, UDC 621.1.016+519.816, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235837.
8. Irodov V.F. and Khatskevych Yu.V. [Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations]. *Stroyteljstvo, materyalovedenye, mashynostroenye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2017, iss. 98, pp. 91–96.
9. Irodov V.F. and Barsuk R.V. *Zahal'na skhema pobudovy alhorytmiv samoorhanizatsiyi modeley skladnykh system z vykorystannyam evolyutsiynoho poshuku rishen'* [The general scheme of building algorithms for self-organization of models of complex systems using evolutionary search for solutions]. *Stroyteljstvo, materyalovedenye, mashynostroenye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2015, iss. 86, pp. 43–49. (in Ukrainian).
10. Ivakhnenko A.G. *Induktivnyy metod samoorganizatsii modeley slozhnykh sistem* [Inductive method of self-organization of models of complex systems]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1982, 296 p. (in Russian).
11. Irodov V. Self-organization methods for analysis of nonlinear systems with binary choice relations. *Journal Systems Analysis Modeling Simulation.* New-York, USA Inc: Gordon and Breach Science Publishers, 1995, vol. 18–19, pp. 203–206.
12. Irodov V.F. *O postroyenii i skhodimosti evolyutsionnykh algoritmov samoorganizatsii i sluchaynogo poiska* [On the construction and convergence of evolutionary algorithms of self-organization and random search]. *Avtomatyka* [Automation]. 2009, no. 4, pp. 34–43. (in Russian).

Надійшла до редакції: 02.03.2024.

УДК 69.009:658.513.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.151.1068

ANALYSIS OF THE FUNCTIONALITY OF LOGISTICS MANAGEMENT FOR EFFECTIVE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

DONENKO V.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BOBRAKOV A.A.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BEINER N.V.³, *Cand. Sc. (Tech.)*,
BEINER P.S.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.)*,
CHECHEL M.V.⁵, *Sen. Lect.*,
IVANENKO D.S.⁶, *PhD Stud.*

¹ Department of Civil Engineering, Urbanism and Spatial Planning, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 17, Ioanna Pavla II St., Kyiv, 01042, Ukraine, tel. +38 (066) 196-28-28, e-mail: donenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5728-5081

² Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, +38 (067) 458-13-38, e-mail: atomtrakt@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-7915-2642

³ Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (050) 670-68-07, e-mail: beynern@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6695-577X

^{4*} Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (066) 471-40-00, e-mail: beyner@icloud.com, ORCID ID: 0000-0002-3488-767X

⁵ Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (099) 619-17-77, e-mail: chechel@zp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9462-9560

⁶ Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (068) 528-67-86, e-mail: d.sergeevich108@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1635-1214

Abstract. The article delves into the critical role of logistics management in the construction industry, emphasizing the need for efficient material resource management and optimized supply chains. It aims to explore the principles of logistics management in construction organizations for supply chain management, with a specific focus on minimizing costs and optimizing resource utilization. The proposed strategic approach involves the transformation of classical concepts into logistics-oriented organizational activities, integrating advanced technologies and innovative resource management systems to unlock the full potential of material assets and streamline operations. The article underscores the potential impact of these strategies on the nation's economic landscape, emphasizing their contribution to economic stability and resilience. Additionally, the integration of logistics management into construction practices is highlighted as a catalyst for scientific advancements within the field. Serving as a roadmap for construction companies, the article urges the adoption of forward-thinking strategies aligned with the demands of the contemporary construction landscape. By embracing innovative approaches and leveraging advanced technologies, construction organizations can drive economic revitalization and contribute to broader urban development initiatives. Additionally, the article emphasizes the importance of collaboration and integration among stakeholders in the construction industry, leveraging digital platforms and collaborative tools to enhance communication, share real-time data, and streamline coordination among suppliers, logistics providers, and project teams. Integrated logistics networks will enable seamless flow of information and resources.

Keywords: *logistics management; supply chains in construction; resource optimization; construction management*

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛУ ЛОГІСТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЛАНЦЮГАМИ ПОСТАВОК У БУДІВНИЦТВІ

ДОНЕНКО В. І.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БОБРАКОВ А. А.², *канд. техн. наук, доц.*,
БЕЙНЕР Н. В.³, *канд. техн. наук*,
БЕЙНЕР П. С.^{4*}, *канд. техн. наук*,
ЧЕЧЕЛЬ М. В.⁵, *ст. викл.*,
ІВАНЕНКО Д. С.⁶, *асп.*

¹ Кафедра будівництва, урбаністики та просторового планування, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, 01042, Київ, Україна, тел. +38 (066) 196-28-28, e-mail: donenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5728-5081

² Кафедра будівництва, урбаністики та просторового планування, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 458-13-38, e-mail: atomtrakt@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-7915-2642

³ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (050) 670-68-07, e-mail: beynern@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6695-577X

^{4*} Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (066) 471-40-00, e-mail: bevner@icloud.com, ORCID ID: 0000-0002-3488-767X

⁵ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (099) 619-17-77, e-mail: chechel@zp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9462-9560

⁶ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (068) 528-67-86, e-mail: d.sergeevich108@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1635-1214

Анотація. Розглядається роль логістичного менеджменту в будівельній галузі, підкреслюється необхідність ефективного управління матеріальними ресурсами та оптимізації ланцюгів поставок. *Мета статті* – дослідження принципів формування логістичного менеджменту в будівельних організаціях для керування поставками з акцентом на мінімізацію витрат та оптимізацію використання ресурсів. Запропонований стратегічний підхід передбачає трансформацію класичних концепцій в логістично-орієнтовану організаційну діяльність, інтеграцію передових технологій та інноваційних систем управління ресурсами для розкриття повного потенціалу матеріальних активів та оптимізації операцій. Підкреслюється потенційний вплив цих стратегій на розвиток економіки країни, наголошується на їх внеску в економічну стабільність. Інтеграція логістичного менеджменту в будівельну сферу виступає каталізатором наукового прогресу в цій галузі. Стаття слугує дорожньою картою для будівельних компаній і закликає до прийняття далекоглядних стратегій, що відповідають вимогам сучасного будівельного ринку. Застосовуючи інноваційні підходи та передові технології, будівельні організації можуть сприяти економічному відродженню після перемоги та зробити свій вклад у ширші ініціативи з розвитку міст. Акцентовано увагу на важливості співпраці між стейкхолдерами в будівельній галузі, використання цифрових платформ та інструментів спільної роботи для поліпшення комунікації, обміну даними в режимі реального часу та оптимізації координації між постачальниками, логістичними провайдером та проектними командами. Інтегровані логістичні мережі забезпечать безперервний потік інформації та матеріальних ресурсів.

Ключові слова: управління логістикою; ланцюги поставок у будівництві; оптимізація використання ресурсів; управління будівництвом

Introduction. The relevance of logistics in the contemporary business landscape is undeniable, with a multitude of researchers and industry professionals directing their focus towards addressing logistical challenges. It is noteworthy that enterprises allocate a substantial portion of their revenue (up to 35 %) to logistics, depending on the nature of their operations, geographical scope, and other pertinent characteristics. Furthermore, developed nations invest billions of dollars in logistics annually, with a consistent trend of escalating expenditure over the years. Notably, the transportation component accounts for a significant share of logistical expenses across virtually all countries.

In the context of the construction industry, the efficient management of material resources

and the optimization of supply chains are paramount. The complexities of modern construction necessitate a strategic approach to minimize costs and enhance operational efficiency. This article delves into the fundamental role of material resource management in the construction sector, advocating for the meticulous analysis and transformation of classical concepts into logistics-oriented organizational activities. By integrating cutting-edge technologies and scientific methodologies, construction organizations can unlock the full potential of their material assets and streamline their operations..

The objective of this article is to optimize management systems in construction organizations, aiming to streamline operational

processes, enhance resource utilization, improve project efficiency, and ultimately contribute to the overall advancement and sustainability of the construction industry.

The research methodology through the exploration of innovative logistical principles and the implementation of effective supply chain management strategies, the article seeks to provide actionable insights for construction organizations to adapt to evolving market demands, fortify project management practices, and foster a more resilient and competitive construction. In addition, scientific publications on the topic are analyzed and systematized. A review of current publications that have been published in recent years is made.

State of the issue and research objectives. The text Y. Zhang [1] underscores the significance of leveraging big data and IoT (Internet of Things) in logistics management to enhance operational efficiency, security, and information management. It highlights the transition from manual-based logistics to a data-driven approach, emphasizing the potential for improved decision-making and risk mitigation. The integration of genetic algorithms and big data technologies in logistics management signifies a shift towards advanced, automated, and intelligent logistics systems.

Kitsis A. M., Chen I. J. [2] highlights the significance of stakeholder pressures, including those from media, customers, employees, government, NGOs (non-governmental organizations), and rivals, as driving forces for firms to engage in environmental sustainability. In the construction industry, stakeholders such as regulatory bodies, local communities, and environmental organizations exert pressures that influence the adoption of green supply chain practices and sustainable construction operations. They provide valuable insights into the theoretical foundations, survey methodologies, and implications of stakeholder pressures on green operations, offering a framework for understanding and implementing sustainable practices in construction logistics management.

The emphasis on GSCM (Green Supply Chain Management) implementation and the

conservation of resources resonates with your objective of proposing a strategic approach to minimize costs through the optimization of supply chains and logistics-oriented organizational activities. These stages [3] represent different aspects of the construction process, from the initial stages of material sourcing and production (upstream) to the actual construction activities (midstream) and finally to the delivery and distribution of the finished products or services (downstream).

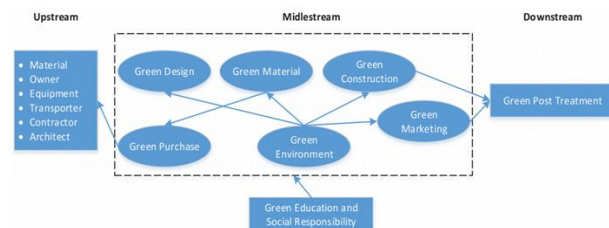


Fig. 1. Value chain construction industry [3]

Figure 1, in the context of the construction industry, the upstream stage typically involves activities related to the extraction, processing, and supply of raw materials such as timber, steel, concrete, and other construction materials. The midstream stage encompasses the actual construction processes, including building and infrastructure development, as well as the coordination of various construction activities. The downstream stage involves the distribution, delivery, and maintenance of the constructed facilities or structures. The concept of the value chain in the construction industry consisting of upstream, midstream, and downstream stages provides a framework for analyzing and optimizing the various processes involved in construction, ultimately contributing to improved resource management, operational efficiency, and stakeholder collaboration.

The article [4] emphasizes the critical role of an efficient logistic information platform product supply chain in the modernization of agriculture. It addresses the existing challenges in the agricultural supply chain network of the country, including inadequate facilities, limited operational integration, high logistics costs, supply and demand imbalances, and significant concerns related to agricultural product quality and safety. The paper proposes a solution by incorporating big data technology to investigate

an intelligent agricultural product supply chain system. Additionally, the network equilibrium method is employed to develop a model for the agricultural product supply chain network. The model considers the collaborative efforts of multiple producers and retailers, presenting a comprehensive approach to enhancing efficiency and addressing key issues in the agricultural supply chain.

In the article by [5], the pivotal role of innovation capability among logistics professionals in enhancing the competitiveness of the logistics industry is underscored. It emphasizes the importance of reinforcing the development of scientific research skills among logistics talents to elevate their innovation and research proficiency, thereby stimulating technological advancement within the agricultural product logistics industry. Moreover, the article advocates for the encouragement of entrepreneurial initiatives among logistics talents, offering entrepreneurial support and services to fuel their innovative drive and bolster the innovative progression of the logistics sector. It also stresses the establishment of a logistics talent innovation platform as a critical step in fostering an environment conducive to continuous innovation within the industry.

This study [6] significantly contributes to the field of GSCM and Technological Innovation (TI) literature, providing valuable insights for managers and entrepreneurs aiming to establish an ecologically sustainable society and validate their practices. The research underscores the importance of technological innovation and the adoption of GSCM practices in attaining competitive advantages, offering a foundational framework for managers, practitioners, and environmental management researchers to highlight the value of GSCM practices in enhancing operational sustainability.

However, certain limitations are evident in this study. Firstly, it is confined to the manufacturing sector of a single country. Secondly, the generalizability of the study is constrained due to data obtained from a single respondent per firm, typically from top or middle management. Additionally, the data

predominantly represent large firms, with limited inclusion of Small and Medium Enterprises (SMEs). Future research could focus on SMEs, exploring the interplay between various dimensions of GSCM (e.g., green transportation, internal environmental management, green packaging, and green distribution) and green innovative performance within the context of the construction industry.

The valuable research [7] can serve as a guide for industries seeking to transition from traditional supply chain management to GSCM, offering insights into essential barrier categories and the sequential eradication of these barriers. Furthermore, the study's identification of 26 essential barriers out of 47 provides a foundation for future research to explore additional barrier categories and sectors for a more comprehensive understanding of GSCM implementation.

In the context of Ukraine's post-war reconstruction, this research could inform the country's industrial sectors on the pivotal role of identifying and addressing essential barriers to facilitate the adoption of environmentally sustainable supply chain practices. By recognizing and gradually mitigating these barriers, industries can work towards establishing ecologically responsible supply chains, contributing to the country's overall environmental rehabilitation and sustainable development efforts.

The research topic remains highly relevant and is being explored by numerous scholars [1-12]. Considering our analysis, it is evident that as researchers, we should contribute to understanding and overcoming barriers in the adoption of environmentally sustainable logistics practices. In the future, we can use the results of such research for the reconstruction of cities post-victory, highlighting the critical importance of integrating logistical principles within the construction industry.

Presentation of the main material.

Resource management is a deliberate exertion of influence by process participants on the evolving characteristics of logistics flow to accomplish predetermined objectives through resource redistribution. In the resource management system of production activity, the

focus lies on the process of movement of resource flows (logistics process) as the object of management, while the closed cycle of labor item reproduction (logistics cycle) serves as the subject. Participants of the logistics process act as the focal point.

In this context, construction logistics represents a methodical approach to shaping and overseeing a series of construction material support flows (resource support) aimed at ensuring the optimal balance between cost and service quality for consumers of construction products and services, particularly within competitive market conditions. This is achieved through the dynamic stability of integral flow characteristics, their synergism, and adaptability in the external environment.

The construction logistics system, tailored to the specific needs of construction enterprises, encompasses a series of coordinated actions by project participants, intricately linked within a unified logistics chain. These participants include manufacturers, suppliers, material bases, construction enterprises, and transport companies, working collaboratively to ensure the realization of project objectives.

An effective construction logistics system also emphasizes sustainability and environmental impact, ensuring that resource flows and material support are managed in a manner that aligns with eco-friendly practices, minimizing the ecological footprint of construction activities (Fig. 2).

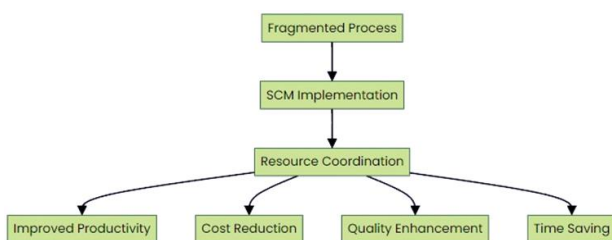


Fig. 2. Key Points for SCM optimization

To enhance residential construction, the article outlines several key points to consider when implementing SCM (Fig. 2):

- Resource coordination: Ensuring timely availability at all stages;
- Productivity: Cost reduction, quality enhancement, and time-saving;

- Research methodology: Using questionnaires for builder insights.

The rational implementation of a logistics system in industrial building and structure reconstruction projects allows for the enhancement of the resource provision system for each subsystem, encompassing planning, regulation, and control.

The construction process, characterized by significant participant fragmentation, often leads to various challenges stemming from the lack of coordination among involved parties. Supply Chain Management (SCM) offers several principles aimed at mitigating this fragmentation and minimizing its impact. Nevertheless, it's crucial to note that these principles were primarily developed within the manufacturing environment, which inherently offers more favorable conditions for their application.

Future research endeavors should focus on digital transformation, sustainable innovation, regulatory impacts, and benchmarking best practices within logistics management for construction organizations. By addressing these areas, the construction industry [8] can elevate its SCM practices, fostering a more sustainable, resilient, and efficient future, thereby aligning with the evolving landscape of logistical principles in construction.

The paper [9] contributes to the understanding of construction supply chain management by proposing methods for improvement based on a comprehensive literature review. It emphasizes the need for benchmarking, performance measurement, waste identification and elimination, knowledge management, and the application of information technology to enhance supply chain processes in the construction industry. Also highlights the unique challenges and characteristics of construction supply chains, such as intermittent flow and non-repeated projects, and the importance of integrated efforts to improve performance and reduce waste. It underscores the significance of human

resources and training in strengthening supply chain implementation and performance.

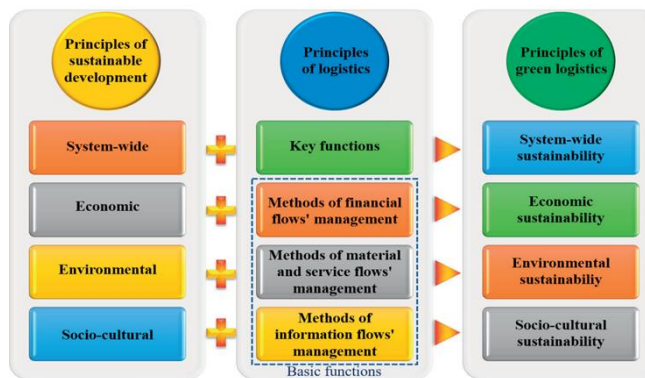


Fig. 3. Conceptual framework of Green logistic [10]

In the context of sustainable development, it is evident from Figure 3 that benchmarks for measuring the success of transport businesses encompass factors related to sustainable development, which hold particular significance for the logistics field [10]. However, there have been challenges in comprehending, developing, and implementing green logistics (GL). Therefore, the primary focus of this work is to underscore the pivotal aspects of the role of GL in establishing a sustainable supply chain.

The importance of human resource management, implementation of information technology and knowledge management are also highlighted as key aspects for improving supply chain management in construction. Thus, to formulate logistics management principles in construction organizations for supply chain management, it is necessary to pay attention to benchmarking, improving supplier performance, eliminating waste, training and information sharing, as well as implementing information technology and knowledge management.

Upon acquiring the necessary permissions, the critical task of establishing a proposal chain becomes paramount. Particularly in the realm of social housing, developers maintain relationships with material suppliers, sub-contractors, and clients, shaping the construction supply chain based on these connections. Similarly, private developers uphold associations with material and labor suppliers, tailoring their own supply chain in alignment with their specific designs. Within

the residential construction sector, the pricing process becomes a pivotal component of the product delivery methodology, wherein developers oversee material, financial, resources, and information flows alongside on-site construction processes.

The integration of green logistics practices is essential for mitigating the environmental impact of transportation and warehousing activities in the construction industry. By emphasizing sustainable practices, risk management, and collaboration, construction organizations can align their logistics operations with global environmental goals and contribute to sustainable development.

In the realm of construction logistics, establishing a robust proposal chain is crucial for developers, especially in the domain of social housing. Developers cultivate relationships with material suppliers, sub-contractors, and clients, shaping the construction supply chain around these connections. Similarly, private developers tailor their supply chains based on associations with material and labor suppliers, aligning them with their specific design requirements. Within the residential construction sector, the pricing process holds paramount importance, as developers oversee material, financial, resource, and information flows alongside on-site construction processes.

The integration of green logistics practices emerges as a vital strategy for mitigating the environmental impact of transportation and warehousing activities in the construction industry. By emphasizing sustainability, risk management, and collaboration, construction organizations can align their logistics operations with global environmental objectives and contribute to sustainable development. The distinction between traditional logistics and green logistics in the construction industry lies in their approaches to environmental impact and sustainability. While traditional logistics prioritizes efficient material resource management and supply chain optimization to minimize costs and enhance operational efficiency, green logistics places a strong emphasis on reducing the environmental

footprint of transportation and warehousing activities.

The key difference between traditional logistics and green logistics in the construction industry lies in their approach to environmental impact and sustainability. Traditional logistics primarily focuses on the efficient management of material resources and supply chains to minimize costs and enhance operational efficiency. On the other hand, green logistics places a strong emphasis on mitigating the environmental impact of transportation and warehousing activities in the construction industry.

In the coming years, the field of construction logistics is expected to undergo significant transformations driven by technological advancements and innovative practices. These future trends have the potential to revolutionize the industry, enhancing efficiency, safety, and sustainability in construction logistics operations.

The future of construction logistics is increasingly focused on green and sustainable practices [11]. Green logistics initiatives aim to minimize the environmental impact of transportation and warehousing activities by promoting energy-efficient vehicles, eco-friendly packaging, and optimized delivery routes.

Conclusions.

The article provides a comprehensive analysis of the role of logistics management in the construction industry, emphasizing the need for efficient material resource management and optimized supply chains. Also highlights the potential impact of these strategies on economic stability and resilience, urging construction companies to adopt forward-thinking strategies aligned with the demands of the contemporary construction landscape.

The integration of green logistics practices is highlighted as a positive practice in the global logistics industry, emphasizing the importance of sustainable practices, risk management, and collaboration in the construction industry. In future need research to focus on digital transformation, sustainable innovation, regulatory impacts, and benchmarking best practices within logistics management for construction organizations.

In conclusion, the principles of logistics management in construction organizations play a pivotal role in ensuring the seamless flow of materials, resources, and information throughout the supply chain. The future of construction logistics is increasingly focused on green and sustainable practices, which aim to minimize the environmental impact of transportation and warehousing activities by promoting energy-efficient vehicles, eco-friendly packaging, and optimized delivery routes.

REFERENCES

1. Zhang Y. Construction of Logistics Management System of Internet of Things Based on Genetic Algorithm Driven by Big Data. 2022 International Conference on Industrial IoT, Big Data and Supply Chain (IIoTBDSC), Beijing, China, 2022, pp. 356–360, doi: 10.1109/IIoTBDSC57192.2022.00072.
2. Kitsis A.M. and Chen I.J. Do stakeholder pressures influence green supply chain Practices? Exploring the mediating role of top management commitment. *Journal of Cleaner Production*. 2021, p. 316.
3. Wibowo M.A., Handayani, N.U. and Mustikasari A. Factors for implementing green supply chain management in the construction industry. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2018, no. 11(4), pp. 651–679.
4. Xu X.H. Construction of intelligent logistics information platform for cold chain of agricultural products based on big data technology. *Heilongjiang Grain*. 2021, no. 221 (10), pp. 123–124.
5. Peng S.Y. Logistics cost accounting and control strategy of agricultural products. *China Logistics and Procurement*. 2022, no. 8, pp. 85–86.
6. Khan S.A.R. Practical Implications and Recommendations for Green Supply Chain Management In The Critical Success Factors of Green Supply Chain Management in Emerging Economies. 2020, pp. 241–250.
7. Govindan K., Kaliyan M., Kannan D. and Haq A.N. Barriers analysis for green supply chain management implementation in Indian industries using analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*. 2014, no. 147, pp. 555–568.

8. Jaisree K.B. and Palani B. Supply chain management in construction projects: a comprehensive analysis of the Indian context : review. *International Journal of Research and Review*. 2024, no. 11 (1), pp. 298–308. URL: <https://doi.org/10.52403/ijrr.20240132>.
9. Georgios A. Papadopoulos, Nadia Zamer, Sotiris P. Gayialis and Ilias P. Tatsiopoulos Supply Chain Improvement in Construction Industry. *Universal Journal of Management*. 2016, no. 4 (10), pp. 528–534. URL: <http://www.hrpub.org>; DOI: 10.13189/ujm.2016.041002.
10. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N. and Muravev D. Green Logistics : Element of the Sustainable Development Concept. Part 1, *Naše more*, vol. 64, no. 3, pp. 120–126, Nov. 2017, doi: 10.17818/NM/2017/3.7.
11. Tumpa T.J., Ali S.M., Rahman M.H., Paul S.K., Chowdhury P. and Khan S.A.R. Barriers to green supply chain management : an emerging economy context. *Journal of Cleaner Production*. 2019, no. 236, pp. 117617.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang Y. Construction of Logistics Management System of Internet of Things Based on Genetic Algorithm Driven by Big Data. *2022 International Conference on Industrial IoT, Big Data and Supply Chain (IIoTBDSC)*, Beijing, China, 2022. Pp. 356–360. DOI: 10.1109/IIoTBDSC57192.2022.00072.
2. Kitsis A. M., Chen I. J. Do stakeholder pressures influence green supply chain Practices? Exploring the mediating role of top management commitment. *Journal of Cleaner Production*. 2021. P. 316.
3. Wibowo M. A., Handayani N. U., Mustikasari A. Factors for implementing green supply chain management in the construction industry. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2018. № 11(4). Pp. 651–679.
4. Xu X.H. Construction of intelligent logistics information platform for cold chain of agricultural products based on big data technology. *Heilongjiang Grain*. 2021. № 221 (10). Pp. 123–124.
5. Peng S. Y. Logistics cost accounting and control strategy of agricultural products. *China Logistics and Procurement*. 2022. № 8. Pp. 85–86.
6. Khan S. A. R. Practical Implications and Recommendations for Green Supply Chain Management In The Critical Success Factors of Green Supply Chain Management in Emerging Economies. 2020. Pp. 241–250.
7. Govindan K., Kaliyan M., Kannan D. and Haq A. N. Barriers analysis for green supply chain management implementation in Indian industries using analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*. 2014. № 147. Pp. 555–568.
8. Jaisree K. B., Palani B. Supply chain management in construction projects: a comprehensive analysis of the Indian context : review. *International Journal of Research and Review*. 2024. № 11 (1). Pp. 298–308. URL: <https://doi.org/10.52403/ijrr.20240132>
9. Georgios A. Papadopoulos, Nadia Zamer, Sotiris P. Gayialis, Ilias P. Tatsiopoulos Supply Chain Improvement in Construction Industry. *Universal Journal of Management*. 2016. № 4 (10). Pp. 528–534. URL: <http://www.hrpub.org>; DOI: 10.13189/ujm.2016.041002.
10. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green Logistics : Element of the Sustainable Development Concept. Part 1, *Naše more*. Vol. 64, № 3. Pp. 120–126. Nov. 2017. DOI: 10.17818/NM/2017/3.7.
11. Tumpa T. J., Ali S. M., Rahman M. H., Paul S. K., Chowdhury P., Khan S. A. R. Barriers to green supply chain management : an emerging economy context. *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 236. Pp. 117617.

Надійшла до редакції: 24.03.2024.

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 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 05.07.2024 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 10,00. Умовн. фарб.-відб. арк. 10,00.

Обл.-видавн. арк. 20,00. Наклад 50 прим. Зам. 209

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 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 05 July 2024. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 10,00. Conventional colour imprints 10,00.

Publisher's signatures 20,00. Number of copies 50. Order 209