

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

УКРАЇНСЬКИЙ ЖУРНАЛ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 6 (024)
листопад — грудень 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'янка, 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. Налисько, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Т. Д. Нікіфорова, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. І. Проскуряков, 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).
Свідцтво про Державну реєстрацію	друкованого засобу масової інформації – серія КВ № 24586-14526 ПР – видане Міністерством юстиції України 09 жовтня 2020 р.
Засновник та видавець	Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (код за ЄДРПОУ 02070772). Виходить 6 разів на рік.
Рекомендовано до друку	вченою радою «Українського університету науки та технологій» протокол № 6 від 26.12.2024.
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 МОЇСЕСЕНКО
Редактор та коректор Валентина МАЛОВИК

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

UKRAINIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

№ 6 (024)

November – December 2024

Dnipro 2024

EDITORIAL STAFF:

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

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF:

A. S. Belikov, Doctor of Engineering Science, *Prydniprovsk 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, *Kyiv National University, Kyiv*. 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 IIP – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.
Founder & Publisher	State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture". Issued 6 times a year.
Recommended for publication by	Academic Board of the Ukrainian State University of Science and Technologies, no. 6 from 26.12.2024
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>Editor & Proofreader</i> Valentyna MALOVYK

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Самородов О. В., Табачников С. В., Єсакова С. В., Кротов О. В. ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОРЯД РОЗТАШОВАНИХ РІЗНОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ.....	7
Беліков А. С., Железняков Є. О. ДО ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТИЧНИХ УМОВ ТА БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРИ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	25
Беліков А. С., Капля О. І., Капля І. О., Пилипенко О. В. ЗАКОНОДАВЧЕ ВРЕГУЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ НА РАДІОАКТИВНО- ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ КОЛИШНЬОГО УРАНОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....	31
Беліков А. С., Мацук З. М., Коротаєв В. М., Тригубенко В. О. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА АДАПТАЦІЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З УРАХУВАННЯМ ПРИНЦИПУ АДЕКВАТНОСТІ ЙМОВІРНОСТЕЙ.....	42
Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Колесников С. О. МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ДОМІШКИ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ ПРИ СКЛАДНІЙ СХЕМІ ВЕНТИЛЯЦІЇ.....	48
Біляєв М. М., Тимошенко О. А., Калашников А. В., Коваленко А. С., Чірков А. О. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ НА БАЗІ ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ.....	55
Гуль Ю. П., Соболєнко М. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ.....	64
Дашковська О. В., Коломоєць Г. А., Погребняк В. П. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ.....	70
Дерев'янюк В. М., Гришко Г. М., Ватажешин О. В., Дрозд А. А., Димківська А. Д. РОЗРОБКА РОЗЧИНІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$	78
Беліков А. С., Соколов І. А., Стрежежуров Ю. Е., Тодоров О. П., Рагімов С. Ю. ЕКСПРЕС-МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСТНОЇ ЗДАТНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	84
Кульбач А. А., Беліков А. С., Сугак А. О., Клименко Г. О., Рагімов С. Ю. ДО ПИТАННЯ РЕАГУВАННЯ НА ВИНИКНЕННЯ НС В ПРИДНІПРОВСЬКОМУ РЕГІОНІ ТА ВОЄННИЙ СТАН В УКРАЇНІ.....	92
Менейлюк О. І., Нікіфоров О. Л. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШАБЛОНІВ УПРАВЛІННЯ БУДІВНИЦТВОМ.....	98
Наумов В. О., Білоконь А. І. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ АВАРІЙНО-ДЕМОНТАЖНИХ РОБІТ НА ПРОМИСЛОВОМУ ОБ'ЄКТІ, ЗРУЙНОВАНОМУ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ.....	109
Рудін А. А., Несєвря П. І. ЗАСТОСУВАННЯ ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ОСНАЩЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ ПІДРОЗДІЛІВ ЗСУ.....	123
Савченко С. В., Прокоф'єва К. А., Решетілова О. М. ПОШУК МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ДІЛОВОДСТВА ДЛЯ УСТАНОВ, ОРГАНІЗАЦІЙ ТА ПІДПРИЄМСТВ.....	128
Біляєв М. М., Козачина В. А., Кіріченко П. С., Козачина В. В., Кайдаш М. Д. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ.....	135
Дікарев К. Б., Мовчан О. Ю., Папірник Р. Б. ВИКОРИСТАННЯ ЛОКАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА НЕЗНІМНОЇ ОПАЛУБКИ ДЛЯ ЗВЕДЕННЯ МАЛОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ.....	144

CONTENT

Samorodov O.V., Tabachnikov S.V., Yesakova S.V., Krotov O.V. JUSTIFICATION OF THE IMPROVED SOIL BASE MODEL FOR THE CALCULATION OF DIFFERENTLY-STOREYED BUILDINGS.....	7
Bielikov A.S., Zheleznyakov Ye.O. ON THE ISSUE OF RESEARCHING CRITICAL CONDITIONS AND OPERATIONAL SAFETY OF HEAT SUPPLY SYSTEMS DURING EMERGENCY HEAT SUPPLY SHUTDOWNS.....	25
Bielikov A.S., Kaplia O.I., Kaplia I.O., Pylypenko O.V. LEGISLATIVE REGULATION OF ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN THE RADIOACTIVE-CONTAMINATED TERRITORY OF THE FORMER URANIUM PRODUCTION.....	31
Bielikov A.S., Matsuk Z.M., Korotaiv V.M., Tryhubenko V.O. ENSURING THE SECURITY AND ADAPTATION OF CRITICAL INFRASTRUKTURE CONSIDERING THE PRINCIPLE OF PROBABILITY ADEQUACY.....	42
Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V., Kozachyna V.A., Kolesnykov S.O. SIMULATION OF IMPURITY SPREAD IN THE WORKING ROOM WITH A COMPLEX VENTILATION SCHEME.....	48
Biliaiev M.M., Tymoshenko O.A., Kalashnykov A.V., Kovalenko A.S., Chirkov A.O. ANALYSIS OF MASS TRANSFER PROCESSES BASED ON NUMERICAL MODELS.....	55
<u>Gul Yu.P.</u> , Sobolenko M.A. INVESTIGATION OF THE PATTERNS OF STRUCTURE FORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS DURING HEAT TREATMENT.....	64
Dashkovskaya O.V., Kolomoets G.A., Pogrebnyak V.P. ENSURING THE SUSTAINABILITY OF THE UKRAINIAN HIGHER EDUCATION SYSTEM IN WAR CONDITIONS.....	70
Derevianko V.M., Hryshko H.M., Vatazhyshyn O.V., Drozd A.A., Dymkivska A.D. DEVELOPMENT OF SOLUTIONS FOR 3D PRINTING BASED ON THE SYSTEM OF BINDING SUBSTANCES $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SO}_3-\text{H}_2\text{O}$	78
Bielikov A.S., Sokolov I.A., Strezhekurov Yu.E., Todorov O.P., Ragimov S.Yu. IMPROVEMENT OF THERMAL IMAGING CAMERA FOR ASSESSING HEAT FLOW IN WORKPLACES.....	84
Kulbach A.A., Bielikov A.S., Sugak A.O., Klymenko G.O., Rahimov S.Yu. ON THE QUESTION OF THE RESPONSE TO EMERGENCIES IN THE DNIPROVIAN REGION AND THE MARTIAL STATE IN UKRAINE.....	92
Meneylyuk O.I., Nikiforov O.L. METHODOLOGY DEVELOPMENT FOR EFFICIENCY JUSTIFICATION OF CONSTRUCTION MANAGEMENT TEMPLATES.....	98
Naumov V.O., Bilokon A.I. ORGANIZATION OF EMERGENCY DEMOLITION WORKS AT AN INDUSTRIAL FACILITY DESTROYED DUE TO MILITARY ACTIONS.....	109
Rudin A.A., Nesevrya P.I. APPLICATION OF PROBING FOR THE EQUIPMENT OF ENGINEERING UNITS OF THE AFU.....	123
Savchenko S.V., Prokofieva K.A., Reshetilova O.M. SEARCH FOR A MODEL OF OFFICE WORKFLOW OPTIMISATION FOR INSTITUTIONS, ORGANISATIONS AND ENTERPRISES.....	128
Biliaiev M.M., Kozachyna V.A., Kirichenko P.S., Kozachyna V.V., Kaidash M.D. NUMERICAL MODELING OF GROUNDWATER DYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES.....	135
Dikarev K.B., Movchan O.Yu., Papirnyk R.B. UTILIZATION OF LOCAL MATERIALS FOR PERMANENT FORMWORK PRODUCTION FOR LOW-RISE BUILDING CONSTRUCTION.....	144

УДК 624.131:624.15

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.07.1106

ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОРЯД РОЗТАШОВАНИХ РІЗНОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

САМОРОДОВ О. В.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,

ТАБАЧНИКОВ С. В.², *канд. техн. наук, доц.*,

ЕСАКОВА С. В.³, *канд. техн. наук, доц.*,

КРОТОВ О. В.⁴, *канд. техн. наук*

^{1*} Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 301-76-99, e-mail: osamorodov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4395-9417

² Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (093) 253-02-86, e-mail: s.v.tabachnikov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2619-8612

³ Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 908-68-62, e-mail: esakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6598-5929

⁴ Кафедра геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (050) 401-41-56, e-mail: krotov.project@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7588-1370

Анотація. Постановка проблеми. У галузі будівництва багатоповерхових і висотних будівель при значних навантаженнях на основу, особливо при наявності зверху слабких водонасичених ґрунтів, як правило, застосовують пальово-плитні фундаменти для виконання вимог нормативного документа за гранично допустимими деформаціями. Можливість застосування у цьому випадку плитних фундаментів повинна бути підтверджена розрахунками з науково-технічним обґрунтуванням прийнятої моделі ґрунтової основи та її параметрів. **Мета статті** є обґрунтування удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності та її параметрів на підставі порівняння результатів чисельних розрахунку та спостережень за осіданнями двох поряд розташованих багатоповерхових будівель на плитних фундаментах в процесі будівництва та експлуатації. **Висновки.** Виконано моделювання та розрахунок поряд розташованих плитних фундаментів двосекційної багатоповерхової будівлі з урахуванням різної поверховості секцій в процесі будівництва у системі «основа – фундаменти – споруди», що взаємодіє із удосконаленою моделлю ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності з різними законами деформування ґрунтів. Результати досліджень підтвердили можливість застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи для прогнозування деформацій різноповерхових секційних будівель на великорозмірних плитних фундаментах, в основі яких з поверхні залягають слабкі водонасичені піщані ґрунти. Результати чисельних досліджень показують, що врахування у моделі основи різних величин стисливих товщ під різнонавантаженими фундаментами у поєднанні із законом деформування ґрунту «Hardening Soil» дозволяє найбільш точно моделювати характер горизонтальних переміщень (кренів) кожної із секцій двосекційної будівлі.

Ключові слова: *різноповерхова будівля; плитні фундаменти; ґрунтова основа; стислива товща; модель; удосконалення; натурні спостереження; осідання; крен*

JUSTIFICATION OF THE IMPROVED SOIL BASE MODEL FOR THE CALCULATION OF DIFFERENTLY-STOREYED BUILDINGS

SAMORODOV O.V.^{1*}, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*,

TABACHNIKOV S.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

YESAKOVA S.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

KROTOV O.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 301-76-99, e-mail:

osamorodov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4395-9417

² Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (093) 253-02-86, e-mail: s.v.tabachnikov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2619-8612

³ Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 908-68-62, e-mail: esakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6598-5929

⁴ Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, St. Marshal Bazhanov, Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (050) 401-41-56, e-mail: krotov.project@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7588-1370

Abstract. Formulation of the problem. In the field of construction of multi-story and high-rise buildings, with significant loads on the foundation, especially in the presence of weak water-saturated soils on top, pile-slab foundations are usually used to meet the requirements of the normative document [4] for maximum permissible deformations. The possibility of using slab foundations in this case must be confirmed by calculations with a scientific and technical justification of the accepted model of the soil foundation and its parameters. **The purpose of the** is to substantiate the application of the model of the soil base in the form of an elastic layer of finite width and its parameters based on observations of the subsidence of adjacent multi-story buildings on slab foundations during the construction process and to compare the actual values of foundation deformations with calculated. **Conclusions.** Modeling and calculation have been performed for adjacent slab foundations of a two-section multi-story building, taking into account the different floor counts of the sections during construction in the “base – foundations – structures” system. This system interacts with an improved soil base model, represented as a continuous “stepped” layer of finite distributive capacity with different soil deformation laws. The research results confirmed the possibility of using the improved soil base model for predicting the deformations of differently-storeyed sectional buildings on large slab foundations, where weak water-saturated sandy soils lie close to the surface. Numerical studies indicate that considering different compressible layer thicknesses under variably loaded foundations in the base model, combined with the “Hardening Soil” deformation law, allows for the most accurate modeling of the horizontal displacements (tilts) of each section of the two-section building.

Keywords: *differently-storeyed building; slab foundations; soil base; compressible layer; model; improvement; field observations; settlement; tilt*

Мета. Метою роботи є обґрунтування удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності [6; 21] та її параметрів на підставі порівняння результатів чисельних розрахунків та спостережень за осіданнями двох поряд розташованих багатоповерхових будівель на плитних фундаментах в процесі будівництва та експлуатації.

Вступ. Ще з минулого сторіччя при інженерних розрахунках основ та фундаментів широко застосовувалася модель ґрунтової основи у вигляді суцільного лінійно-деформованого шару, так як вона пропонувалася державними будівельними нормами, в тому числі й сучасними [4] та вимагає завдання лише товщини шару H (стисливої товщі) та деформаційних характеристик ґрунту (модуля загальної деформації E та коефіцієнта Пуассона ν). При цьому, ця аналітична модель не має обмежень у плані. Сьогодні, через потужний розвиток

інформаційних технологій, при моделюванні та чисельних розрахунках системи «основа – фундаменти – споруди» («ОФС») у потужних розрахункових комплексах SOFiSTiK, ABAQUS, Plaxis, SCAD, Ліра тощо, як правило, у просторовій постановці задачі застосовується модель ґрунтової основи у вигляді *суцільного шару скінченної розподільчої здатності* (рис. 1) [8–16; 21] яка, крім обмеження вертикальних деформацій на деякій глибині H , також має обмеження горизонтальних деформацій на відстані від навантаження у плані ($B \times L$).

Такі граничні умови моделі ґрунтуються на тому, що при дії зовнішніх навантажень на ґрунтову основу утворюється просторова область деформування, за межами якої деформаціями ґрунту можна знехувати, так як додаткове навантаження на межах ґрунтового масиву не перевищує структурної міцності ґрунту [15]. При цьому для самої моделі можуть задаватися будь-які закономірності деформування ґрунтів під

навантаженнями, в тому числі й у часі.

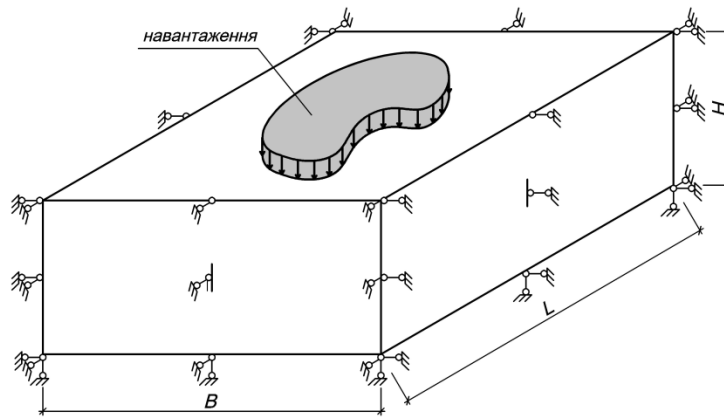


Рис. 1. Модель ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності (для просторових задач)

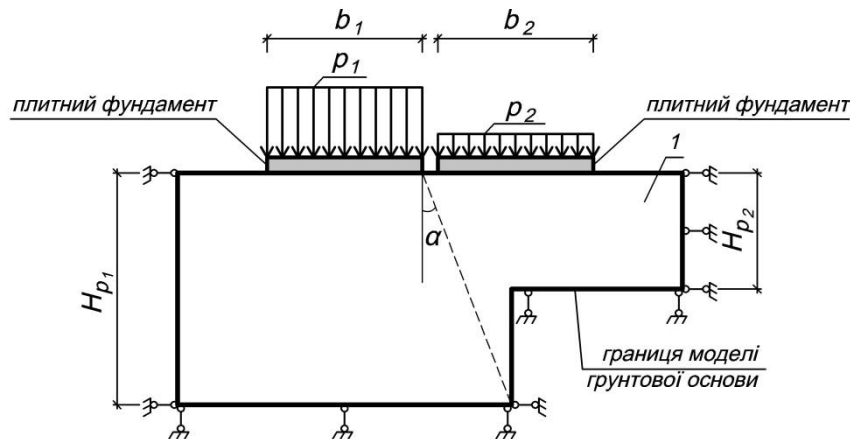


Рис. 2. Приклад побудови нижньої границі удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ

Для розрахунку фундаментів в умовах плоскої деформації ця модель також може бути плоскою, як окремий випадок, яка має відому назву – модель **суцільного шару скінченної ширини** [1].

Матеріали і методи досліджень. Пропонується удосконалена модель ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності (ССШСРЗ), яка дає змогу адекватно враховувати взаємодію великорозмірних фундаментів поряд розташованих різноповерхових споруд [6; 21]. Модель ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ має параметри фізико-механічних характеристик ґрунтів основи, геометричний профіль з урахуванням їх розподільчої здатності та різні граничні умови для моделювання та розрахунку системи «ОФС», але відрізняється тим, що її нижня границя має ступінчастий

геометричний профіль через різні величини стисливих товщ під кожним фундаментом споруд.

На рисунку 2 показано приклад побудови ступінчастої границі нижнього шару удосконаленої моделі ґрунтової основи 1, яка має параметри фізико-механічних характеристик ґрунтів основи і розподільчу здатність, що враховується кутом α [8], та різні величини стисливих товщ (активних зон деформування) $H_{p,i}$ під кожним фундаментом споруд шириною b_i , які передають навантаження на основу p_i .

Об'єктом дослідження є деформації ґрунтової основи плитних фундаментів поряд розташованих житлових шістнадцятиповерхових будівель з підземним та технічним поверхами. Район будівництва – Україна, м. Харків, Основ'янський район, вул. Лисаветинська, 2Б. Загальний вигляд розташування будівель

представлений на рисунку 3 (дослідна будівля 7, секції 1, 2).



Рис. 3. Розташування дослідної будівлі 7 (секції 1 та 2) в процесі зведення

Секції будівлі є подібними, а в плані кожна секція є дзеркальним відображенням поряд розташованої.

Конструктивна схема будівель – безкаркасна. Конструктивна схема перекриття – залізобетонні пустотні плити. Просторова жорсткість будинку забезпечується за рахунок роботи горизонтальних і вертикальних несучих конструкцій (рис. 8).

Несучими елементами будівель є:

- цегляні стіни з силікатної цегли товщиною 150, 250, 380 та 510 мм;
- збірні залізобетонні перекриття, що виконані з багатопустотних залізобетонних плит товщиною 220 мм;
- стіни підвалу збірні з бетонних блоків товщиною 500 мм.

В геологічній будові досліджуваної території до глибини 20,0 м (зверху вниз) беруть участь неоген-четвертинні відкладення, які представлено аллювіально-делювіальними суглинками та пісками, які

перекрито незначним шаром насипних ґрунтів. Нижче залягають зеленувато-сірі та блакитно-сірі глини та зеленуваті піщаники верхнього палеогену які підстиляються глинами київської підсвіти та піщаниками середнього палеогену. Гідрогеологічні умови території вишукувань характеризуються наявністю четвертинного постійного слабонапірного алювіального водоносного горизонту. Сталий рівень підземних вод за період досліджень (червень 2020 р.) зафіксовано на глибинах: 1,8...3,3 м (абс. відмітки 101,51–102,92 м). Територія підтоплена. У паводковий період і при інтенсивних атмосферних опадах рівень підземних вод може досягати відміток близьких поверхні землі.

Схема розташування свердловин представлена на рисунку 4.

Інженерно-геологічний розріз з умовним розташуванням фундаментних плит наведено нижче на рисунку 5.

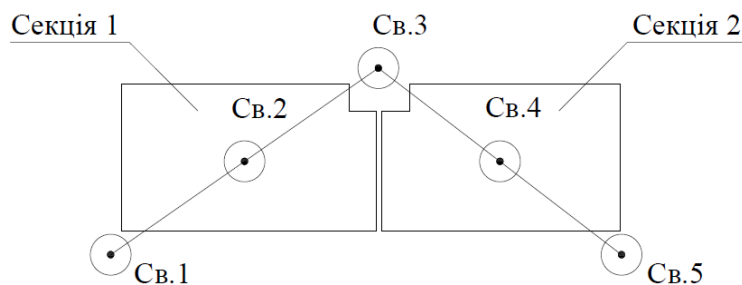


Рис. 4. Схема розташування свердловин

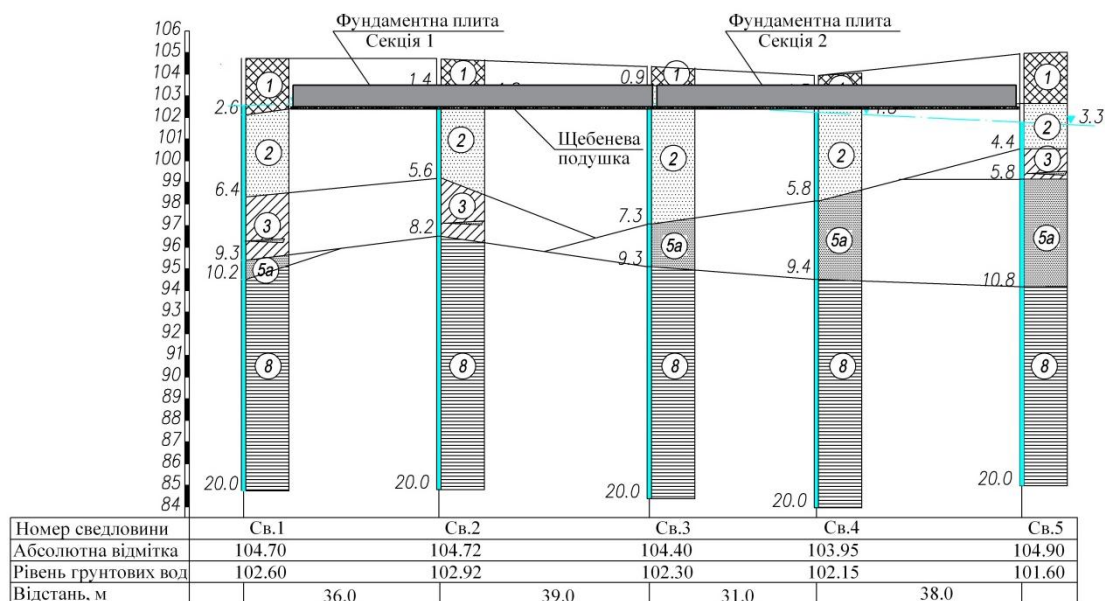


Рис. 5. Інженерно-геологічний розріз

Опис та фізико-механічні властивості ґрунтів представлені в таблиці 1 і 2 (значення питомої ваги ґрунту, питомої ваги водонасиченого ґрунту, модуля деформації, кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення представлені як розрахункові при довірчій ймовірності 0,85. Додатково вказано штамповий модуль деформації E верхньої зони пісків ІГЕ-2, що ущільненні втрамбуванням щебеню катком та утворенням щебеневої подушки товщиною 200 мм).

В якості фундаментів житлових будівель прийняті залізобетонні фундаментні плити товщиною 1000 мм. Низ фундаментних плит прийнято на абс. відмітці 102,80 м.

Ґрунтовою основою фундаментів є ІГЕ-2 – піски дрібні, від малого ступеня водонасичення до насичених водою,

середньої щільності з модулем деформації у водонасиченому стані – $E = 28,0$ МПа (згідно зі звітом з інженерно-геологічних вишукувань). Однак, на підставі додатково проведених штампових випробувань покрівлі пісків ІГЕ-2, що були ущільненні втрамбуванням щебеню катком з утворенням щебеневої подушки товщиною 200 мм – загальний модуль деформації дорівнює $E = 9,0$ МПа, що було й прийнято у розрахунках.

Результати дослідження.

Максимальний середній тиск під фундаментною плитою тільки від власної ваги зведених конструкцій без введення підвищувальних коефіцієнтів не перевищує розрахункового опору ґрунту основи: $p = 230,02$ кПа $< R = 388,0$ кПа.

Таблиця 1

Найменування та опис ґрунтів

Номер ІГЕ	Найменування та опис ґрунтів
ІГЕ-1	Насипні ґрунти – суглинки, піски з включенням будівельного сміття, відсипані сухим способом, характеризуються неоднорідним складом, нерівномірною щільністю та стисливістю, з залишками похованих фундаментів, злежані та незлежані, товщина шару до 2,6 м.
ІГЕ-2	Піски жовто-сірі, сірі дрібні, від малого ступеня водонасичення до насичених водою, середньої щільності (зверху – пухкі), однорідні, з прошарками суглинків та супісків, товщина шару до 5,6 м.
ІГЕ-3	Суглинки зеленувато-сірі, тугопластичної консистенції, в водонасиченому стані – м'якопластичної консистенції, в підшві з лінзами пісків пилуватих, товщина шару до 2,9 м.
ІГЕ-5a	Піски сірі, зеленувато-сірі, голубувато-сірі, дрібні, насичені водою, товщина шару до 5,0 м.
ІГЕ-8	Глини голубувато-сірі, від напівтвердої до тугопластичної консистенції, з прошарками пісковиків, товщина шару до 11,8 м.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості ґрунтів

Характеристика ґрунту	Умовні позначення	Одиниці вимірювання	Шар				
			ПЕ-1	ПЕ-2	ПЕ-3	ПЕ-5а	ПЕ-8
Питома вага ґрунту	γ	кН/м ³	—	18,88	19,40	19,22	16,74
Питома вага водонасиченого ґрунту	γ_{sat}	кН/м ³	—	19,45	19,60	20,23	16,88
Питома вага частин ґрунту	γ_s	кН/м ³	—	26,09	26,68	20,15	26,74
Питома вага зваженого в воді ґрунту	γ_{sb}	кН/м ³	—	9,97	9,99	10,65	7,47
Природна вологість	W	д. од.	—	0,19	0,22	0,19	0,38
Коефіцієнт пористості	e	д. од.	—	0,63	0,68	0,54	1,06
Питома зчеплення ґрунту	c	кПа	—	2	23	4	37
Кут внутрішнього тертя	φ	град.	—	33	18	36	17
Модуль деформацій в природному/ водонасиченому станах	E	МПа	—	-/28(9*)	-/15	-/38	-/13
Показник текучості водонасиченого ґрунту	I_L	д. од.	—	—	0,60	—	0,24
Число пластичності	I_p	д. од.	—	—	0,11	—	0,28

* – значення отримано за результатами штампових випробувань.

Моделювання системи «основа – фундаменти – споруди» та результати розрахунків.

Для дослідження впливу удосконаленої моделі ґрунтової основи за допомогою комплексу PLAXIS 3D створено скінченно-елементну модель системи «основа – фундаменти – споруди», яка складається з ґрунтової основи та двосекційної 17-поверхової споруди на плитних фундаментах.

Елементи конструкції будівлі, а саме плитні фундаменти, стіни, перекриття та покриття, змодельовано пластинчастими скінченними елементами із використанням пружної моделі матеріалу з параметрами, наведеними у таблиці 3. Ґрунтова основа змодельована у вигляді СШСРЗ об'ємними скінченними елементами з фізико-

механічними характеристиками відповідно до інженерно-геологічних умов майданчику будівництва (рис. 5, табл. 2). Потужність (товщина) шару обмежувалася величиною стисливої товщі для кожного етапу навантаження ґрунтової основи від збудованого будівельного об'єму.

При моделюванні ґрунтової основи розглянуто три основні моделі поведінки ґрунтів [18]: лінійно-пружна модель (модель Linear Elastic (LE)), Модель Мора-Кулона (модель Mohr-Coulomb (MC)), Пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту (модель Hardening Soil (HS)).

У таблиці 4 наведено основні прийняті параметри ґрунтів основи для кожної з трьох обраних моделей.

Таблиця 3

Параметри конструкцій споруд

Параметр	Модель матеріалу	Структурний параметр матеріалу	Товщина	Питома вага	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассону
Познач.	<i>Model</i>	<i>Type</i>	<i>d</i>	γ	<i>E</i>	ν
Од. вимір.		—	м	кН/м ³	кН/м ²	од.
Фундаментна плита	Elastic	Непор.	1,0	25,0	30,0·10 ⁶	0,2
Стіна із фундаментних блоків	Elastic	Непор.	0,5	25,0	30,0·10 ⁶	0,25
Цегляна стіна	Elastic	Непор.	0,15 / 0,25 / 0,38 / 0,51	19,0	3,2·10 ⁶	0,25
Плита перекриття	Elastic	Непор.	0,14	25,0	30,0·10 ⁶	0,2

Таблиця 4

Прийняті основні параметри ґрунтової основи для різних моделей

Номер ІГЕ	Найменування та опис ґрунтів	Linear elastic (LE)	Mohr-Coulomb (MC)	Hardening Soil (HS)
ІГЕ-2	Піски жовто-сірі, сірі дрібні, від малого ступеня водонасичення до насичених водою, середньої щільності (зверху – пухкі), однорідні, з прошарками суглинків та супісків	$E' = 9000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$	$E' = 9000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$ $c'_{\text{ref}} = 2 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 33^\circ; \psi = 3^\circ$ $e_{\text{init}} = 0,63$	$E_{50}^{\text{ref}} = 9000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 9000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 27000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 2 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 33^\circ; \psi = 3^\circ; e_{\text{init}} = 0,63$
ІГЕ-3	Суглинки зеленувато-сірі, тугопластичної консистенції, в водонасиченому стані – м'якопластичної консистенції, в підшві з лінзами пісків пілуватих	$E' = 15000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,35$	$E' = 15000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,35$ $c'_{\text{ref}} = 23 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 18^\circ; \psi = 0^\circ$ $e_{\text{init}} = 0,68$	$E_{50}^{\text{ref}} = 15000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 15000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 45000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 23 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 18^\circ; \psi = 0^\circ; e_{\text{init}} = 0,68$
ІГЕ-5a	Піски сірі, зеленувато-сірі, голубувато-сірі, дрібні, насичені водою	$E' = 38000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$	$E' = 38000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,3$ $c'_{\text{ref}} = 4 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 36^\circ; \psi = 6^\circ$ $e_{\text{init}} = 0,54$	$E_{50}^{\text{ref}} = 38000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 38000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 114000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 4 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 36^\circ; \psi = 6^\circ; e_{\text{init}} = 0,54$
ІГЕ-8	Глини голубувато-сірі, від напівтвердої до тугопластичної консистенції, з прошарками пісковиків	$E' = 13000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,4$	$E' = 13000 \text{ кН/м}^2$ $\nu' = 0,4$ $c'_{\text{ref}} = 37 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 17^\circ; \psi = 0^\circ$ $e_{\text{init}} = 1,06$	$E_{50}^{\text{ref}} = 13000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 13000 \text{ кН/м}^2$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 39000 \text{ кН/м}^2$ $c'_{\text{ref}} = 37 \text{ кН/м}^2$ $\varphi' = 17^\circ; \psi = 0^\circ; e_{\text{init}} = 1,06$

Лінійно-пружна модель (модель Linear Elastic (LE)). Лінійно-пружна модель заснована на законі Гука для ізотропної пружності. У цій моделі містяться всього два основних параметри: модуль Юнга (модуль пружності) E , кН/м² та коефіцієнт Пуассону ν , од. Для формування початкового напруженого стану ґрунтової основи, як і в інших застосованих моделях, враховувалась питома вага ґрунту γ , кН/м³, враховуючи гідрогеологічні умови ділянки вишукувань.

Модель Мора-Кулона (модель Mohr-Coulomb (MC)). Пружноідеалопластична Модель Мора-Кулона містить п'ять вхідних параметрів: E , кН/м² і ν , од. – деформаційні параметри ґрунту, φ , ° і c , кН/м² – міцнісні параметри ґрунту, та ψ , °- кут дилатації.

Пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту (модель Hardening Soil (HS)). У цій моделі, як і в моделі Мора-Кулона, граничний напружений стан описується за допомогою кута тертя φ , °, зчеплення c , кН/м² і кута дилатації ψ , °.

Жорсткість ґрунту задається трьома різними вхідними показниками: жорсткість при тривісному навантаженні E_{50} , кН/м², жорсткість при розвантаженні E_{ur} , кН/м² і жорсткість при навантаженні в одометрі E_{oed} , кН/м². В якості значень за замовчуванням пропонуються співвідношення $E_{\text{ur}} \approx 3E_{50}$ і $E_{\text{oed}} \approx E_{50}$. На відміну від моделі Мора-Кулона, пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту враховує також залежність модуля жорсткості від напружень. Це означає, що всі параметри жорсткості збільшуються зі збільшенням тиску. Таким чином, всі три значення вхідної жорсткості відносяться до конкретного еталонного напруження, яке зазвичай приймається рівним 100 кПа.

На рисунках 6 та 7 представлено загальні вигляди послідовного створення досліджуваної системи «основа – фундаменти – споруди».

В якості навантажень враховано власну вагу несучих та огорожуючих конструкцій.

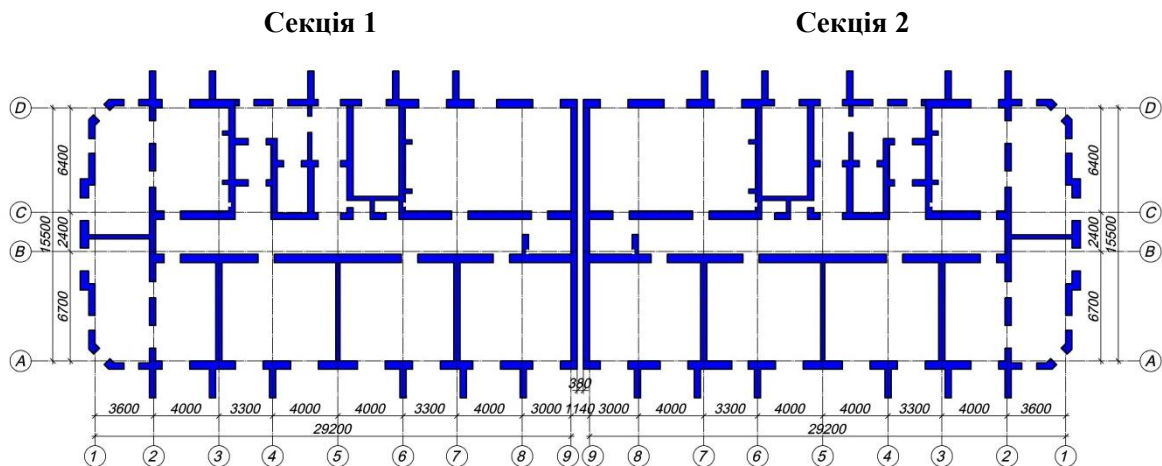


Рис. 6. Загальні вигляди послідовного створення досліджуваної системи «основа – фундаменти – споруди»: план розташування вертикальних несучих елементів будівель

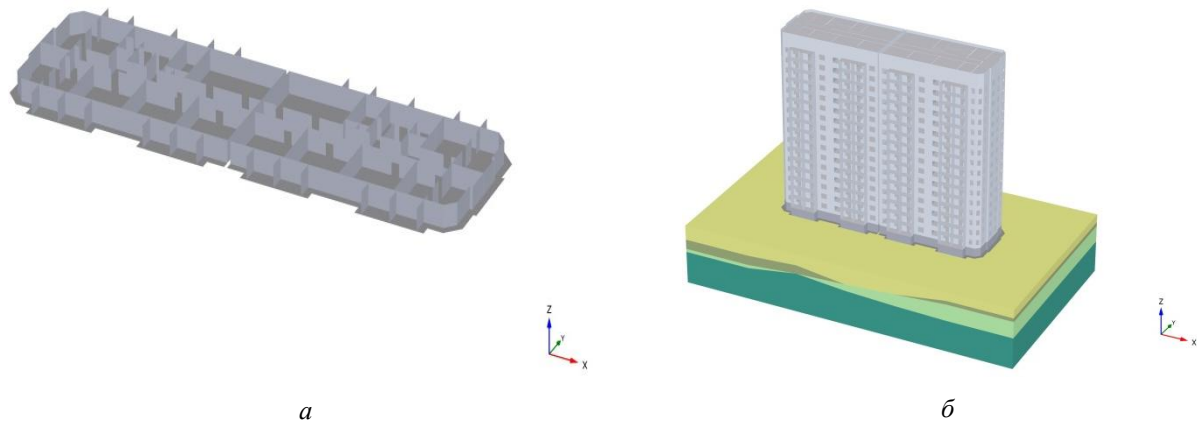


Рис. 7. Загальні вигляди послідовного створення досліджуваної системи «основа – фундаменти – споруди»:
а) схема з'єднання вертикальних несучих елементів з плитними фундаментами;
б) система «основа – фундаменти – споруди»

Згідно із розрахунками [4; 17], без урахування рекомендацій щодо мінімального значення, стислива товща основи прийнята $H_c = 2,0$ м при середньому тиску під подошвою фундаментної плити $p_{\text{серед.}} = 24,95$ кПа, що відповідає власній вазі конструкцій при зведенні цокольного поверху; $H_c = 9,5$ м при $p_{\text{серед.}} = 65,21$ кПа (поверховості $n = 3$ – три зведених поверхи), $H_c = 10,5$ м при $p_{\text{серед.}} = 98,55$ кПа (поверховості $n = 6$ – шість зведених поверхів), $H_c = 11,0$ м при $p_{\text{серед.}} = 120,40$ кПа (поверховості $n = 8$ – вісім зведених поверхів), $H_c = 13,5$ м при $p_{\text{серед.}} = 153,21$ кПа (поверховості $n = 11$ – одинадцять зведених поверхів), $H_c = 16,0$ м при $p_{\text{серед.}} = 191,60$ кПа (поверховості $n = 14$ – чотирнадцять зведених поверхів) $H_c = 18,0$ м при $p_{\text{серед.}} = 230,02$ кПа (поверховості $n = 17$ –

сімнадцять зведених поверхів).

На першому етапі методом скінченних елементів проведено чисельні розрахунки напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» з однаковою максимальною стисливою товщею моделі ґрунтової основи у вигляді СШСРЗ, як показано на рисунку 1.

Вертикальні (за глибиною) та горизонтальні (у плані) границі було обмежено на відстані, яка дорівнювала величині стисливої товщі $H_c = 18,0$ м при повному навантаженні. Тобто розподіл стискаючих напружень за глибиною прийнято під кутом $\alpha = 45^\circ$ до вертикалі від країв навантажених фундаментів [8].

Потужність (товщина) шару обмежувалася величиною стисливої товщі для кожної стадії навантаження ґрунтової

основи від збудованого будівельного об'єму.

Для врахування зміни потужності активної зони (стисливої товщі) під фундаментами в процесі збільшення навантаження на ґрунтову основу застосовано простий підхід з моделювання,

де прийнято практично недеформований жорсткий матеріал із значним модулем пружності $E = 100,0 \cdot 10^9 \text{ кН/м}^2$ нижче за максимальну розрахункову границю відповідно до найбільш навантаженої секції при відповідній кількості збудованих поверхів (рис. 8).

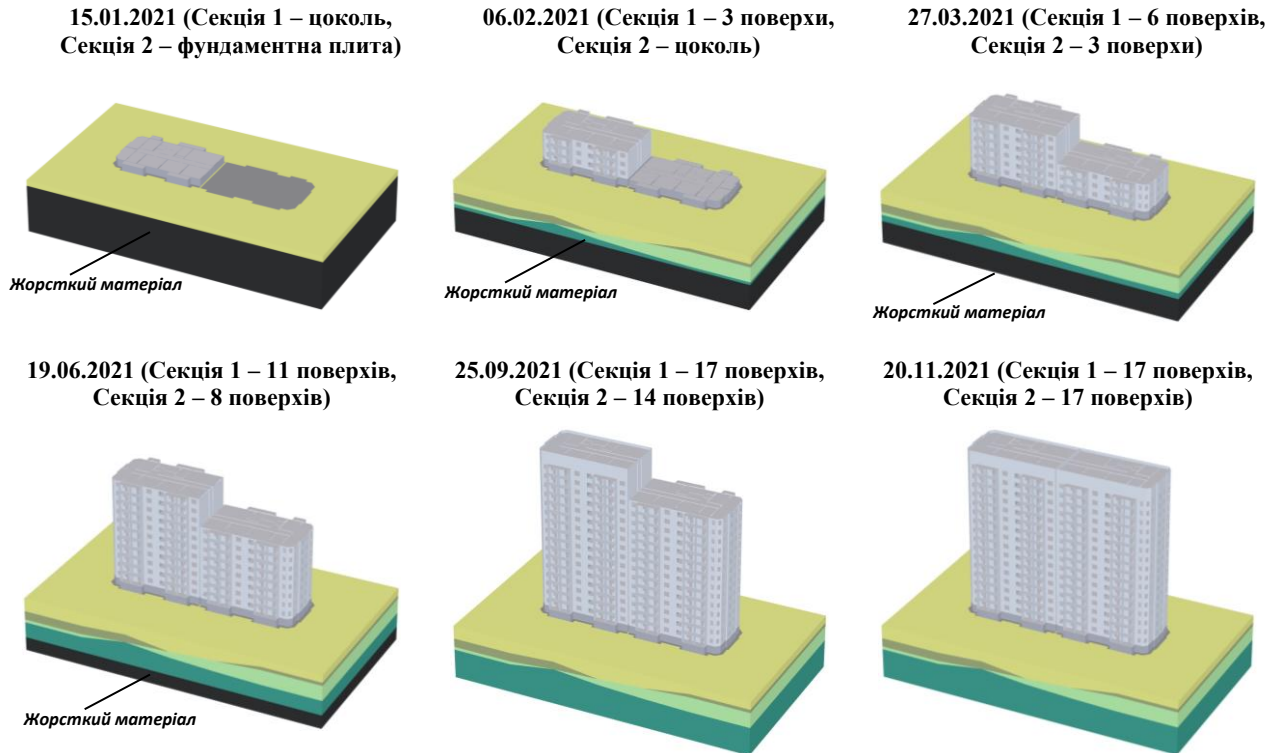


Рис. 8. Розрахункові схеми моделі на 1 етапі досліджень з однаковою стисливою товщею відповідно до дати спостереження та кількості зведених поверхів

На підставі обраних параметрів моделі та вихідної інформації виконано моделювання взаємодії будівель з вказаною моделлю основи. Чисельний розрахунок виконано методом скінченних елементів та отримано абсолютні значення величин напружено-деформованого стану системи. При моделюванні не використовувався розрахунок у часі.

На другому етапі проведено чисельні розрахунки напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» зі ступінчастою стисливою товщею моделі ґрунтової основи, яка враховує кут α та різні величини стисливих товщ під кожним фундаментом споруд в залежності від навантаження, як показано на рисунках 2–3.

Вертикальні (по глибині) границі було

обмежено на глибині, яка дорівнювала величині стисливої товщі H_i для кожного окремого фундаменту, враховуючи різні величини навантажень. Для формування активної зони – стисливої товщі під кожною секцією будівлі при різних навантаженнях розподіл стискаючих напружень по глибині прийнято під кутом $\alpha \approx 25^\circ$ до вертикалі від внутрішнього краю більш навантаженого фундаменту [7]. Горизонтальні (у плані) границі, як і для першого етапу досліджень, було обмежено на відстані, яка дорівнювала максимальній величині стисливої товщі $H = 18,0 \text{ м}$ при максимальному навантаженні.

При побудові ступінчастого нижнього профілю моделі ґрунтової основи з урахуванням різних стисливих товщ застосовано практично недеформований

жорсткий матеріал із значним модулем пружності $E = 100,0 \cdot 10^9 \text{ кН/м}^2$ (рис. 9).

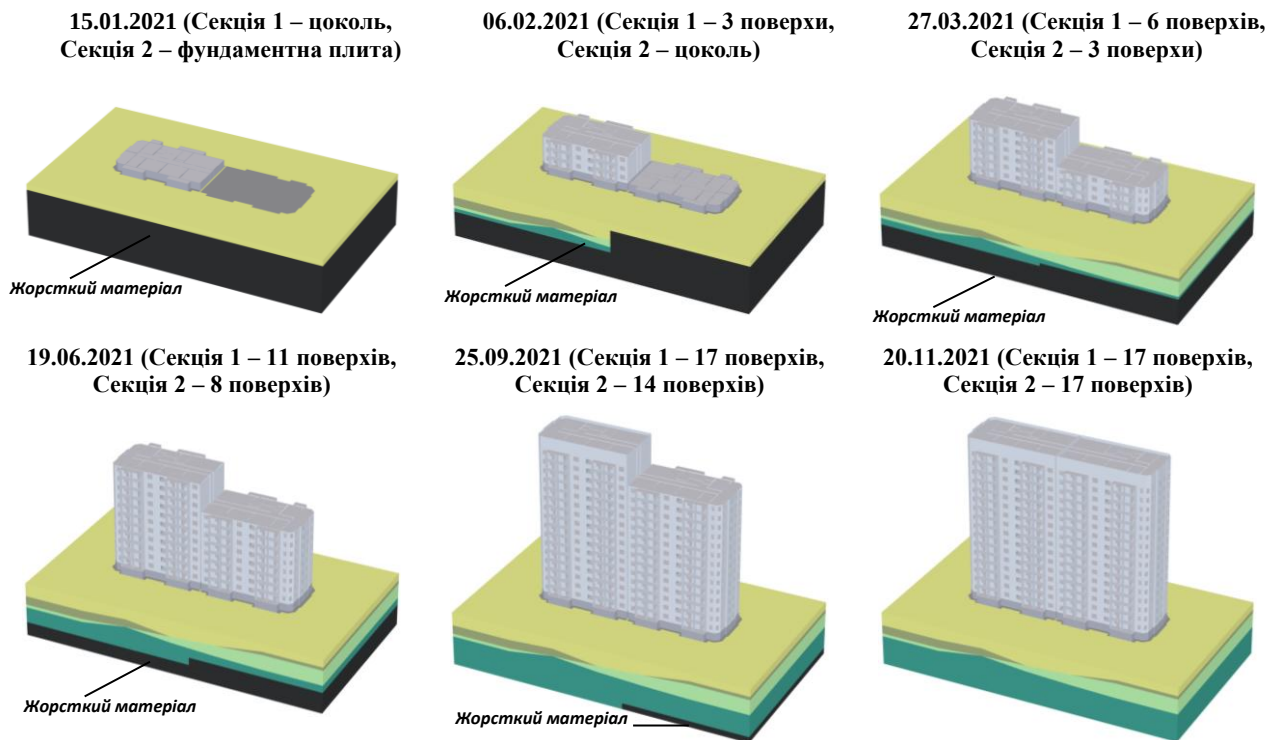


Рис. 9. Розрахункові схеми моделі на 2 етапі досліджень зі ступінчастою стисливою товщею відповідно до дати спостереження та кількості зведених поверхів

Для аналізу отриманих результатів розрахунків та подальшого порівняння з результатами натурних спостережень на скінчено-елементній моделі двосекційної досліджуваної будівлі було обрано точки у тих самих місцях де і осадкові марки на реальній будівлі. Також по висоті кожної секції було обрано додаткові контрольні точки. За результатами моделювання визначено особливості деформування кожної секції будівлі в залежності від співвідношення навантажень, моделі ґрунтової основи та обраної моделі поведінки ґрунтів основи. Отримані розрахункові значення осідань використано у подальшому співставленні з результатами натурних спостережень за осіданнями двосекційної будівлі під час будівництва.

Нижче на рисунку 10 наведено порівняння отриманих розрахункових значень осідань для одного з розрахункових варіантів та вказані максимальні та мінімальні їх значення для двох секцій для моделі ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ з однаковою та ступінчастою стисливими

товщами під фундаментами секцій для різноповерхових стадій будівництва.

Результати спостереження.

Спостереження за осіданнями будівлі проводилися в процесі будівництва методом високоточного нівелювання II класу. Були визначені позначки осадкових марок М.1, М.2, М.3, М.4, М.5, М.6, М.7 та М.8, що були закладені в рівні цокольного поверху обох секцій будівлі (рис. 11).

В процесі будівництва виділено 9 етапів спостережень:

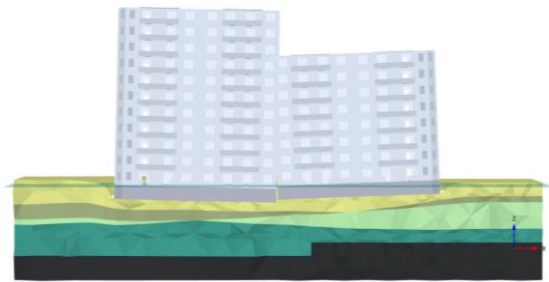
- 1 етап – січень 2021 року – влаштування фундаментної плити 2 секції та цокольного поверху 1-ої секції;
- 2 етап – лютий 2021 року – влаштування цокольного поверху 2 секції та 3-го поверху 1-ої секції;
- 3 етап – березень 2021 року – будівництво 3-го поверху 2 секції та 6-го поверху 1-ої секції;
- 4 етап – червень 2021 року – будівництво 8-го поверху 2 секції та 11-го поверху 1-ої секції;
- 5 етап – вересень 2021 року – будівництво 14-го поверху 2 секції та 17-го

поверху 1-ої секції;

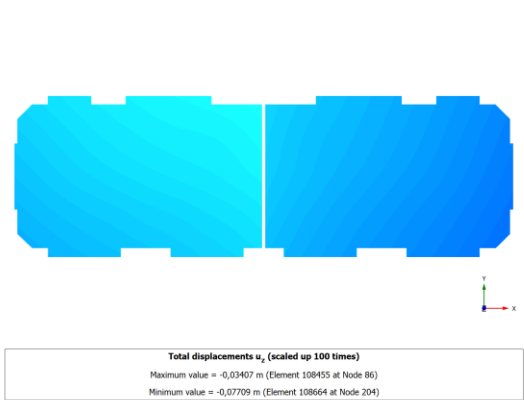
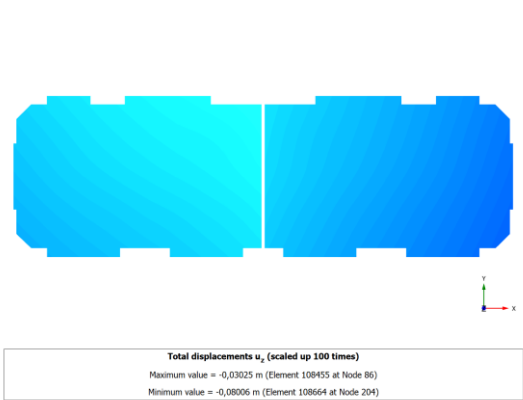
Модель ґрунтової основи з однаковою стисливою товщею
Секція 1 – 11 поверхів, Секція 2 – 8 поверхи



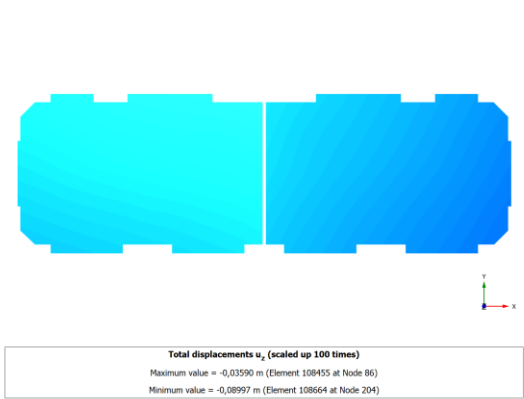
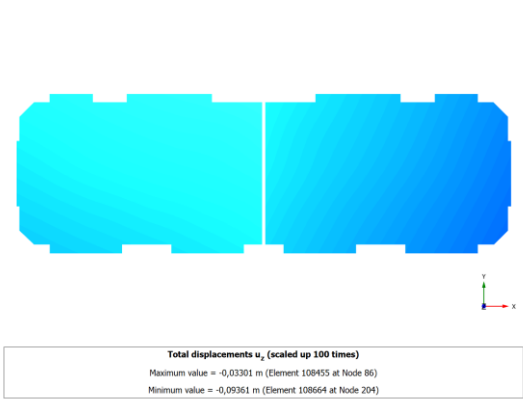
Модель ґрунтової основи зі ступінчастою стисливою товщею
Секція 1 – 11 поверхів, Секція 2 – 8 поверхи



Linear Elastic (LE)



Mohr-Coulomb (MC)



Hardening Soil (HS)

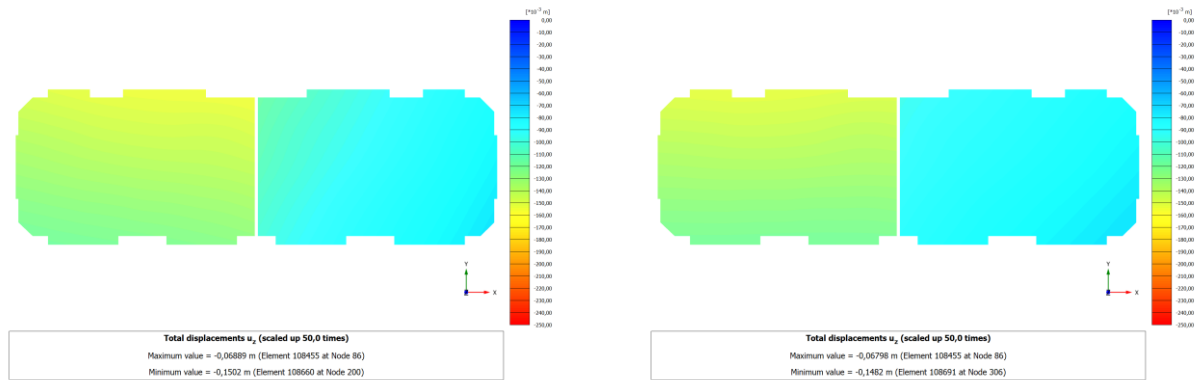


Рис. 10. Порівняння результатів розрахунків при різних стисливих товщах на 19.06.2021

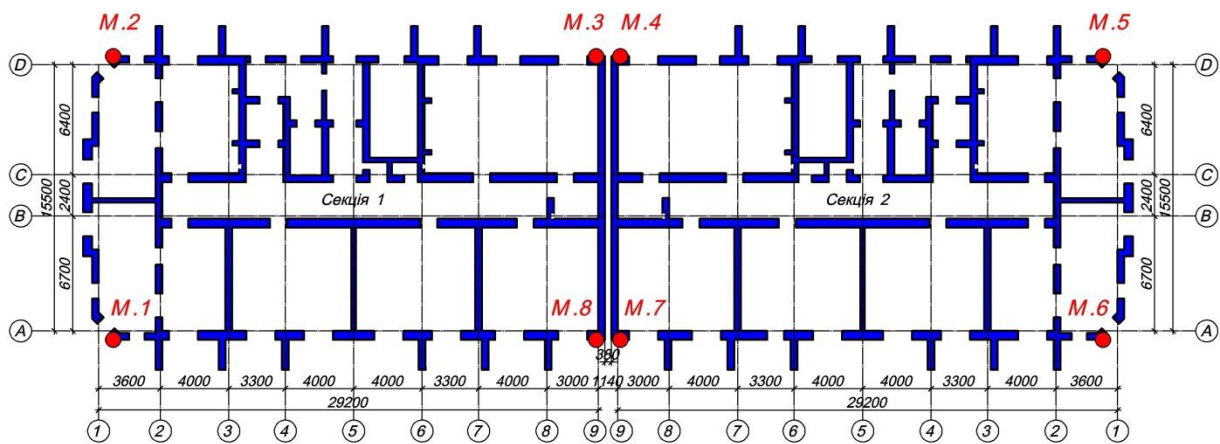


Рис. 11. Схема місць розташування осадкових марок

• 6 етап – листопад 2021 року – будівництво 17-го поверху 2 секції та 17-го поверху 1-ої секції;

• 7 етап – лютий 2022 року – спостереження при незмінному навантаженні при наявності 17-ти поверхів обох секцій 1 та 2;

• 8 етап – грудень 2022 року – спостереження при незмінному навантаженні при наявності 17-ти поверхів обох секцій 1 та 2;

• 9 етап – липень 2023 року – спостереження при незмінному навантаженні при наявності 17-ти поверхів обох секцій 1 та 2.

Для нівелювання було використано нівелір Н-05 й інварну нівелірну рейку РН-05. Нівелювання виконано в прямому і зворотному напрямках шляхом суміщення. На кожній станції за спостереженнями основних і додаткових шкал обчислені перевищення a_z , a_n та їх різниця $h = a_z - a_n$,

яка не перевищувала 0,7 мм. Для прямого і зворотного ходів по кожній секції (між суміжними реперами в ході) обчислені суми перевищень прямого $[h]_n$ і зворотного $[h]_z$ ходів. Розбіжності f_x не перевищували $\pm 2,1$ мм (L – довжина ходу в км) при кількості станцій менше 15. Для точності підрахунків використана програма Microsoft Excel, а зрівнювання результатів проводилось в програмі ARMGEO. Геодезичні роботи та розрахунки виконані к. т. н., доц. Наливайком Т. А.

На рисунку 12 наведено графіки фактичних і розрахункових осідань двох секцій будівлі від контрольованих реальних навантажень у процесі будівництва (враховувалася тільки власна вага зведених конструкцій без підвищувальних коефіцієнтів).

Для більшої наочності нижче на рисунках 13 та 14 наведено порівняння фактичних осідань із розрахунковими

значеннями для моделі ґрунтової основи у вигляді СШСРЗ зі ступінчастою стисливою товщею під фундаментами секцій на момент коли як Секція 1 так і Секція 2 були збудовані до 17 поверхів при середньому значення тиску під фундаментними плитами, який дорівнює $p_{\text{сер.}} = 230,02 \text{ кН/м}^2$.

На рисунку 15 наведено графіки фактичних і розрахункових горизонтальних переміщень (нахилів) двох секцій у повздовжньому напрямку будівлі від контрольованих реальних навантажень у процесі будівництва (враховувалася тільки власна вага зведених конструкцій без

підвищувальних коефіцієнтів).

Як видно з графіків на рисунках 13–14 найбільш близькі розрахункові значення осідань у порівнянні із фактичними, виміряними при натурних спостереженнях для кожної секції будівлі, отримано при використанні моделі НС, хоча перевищення фактичних значень над розрахунковими складає 28 % для першої секції та 43 % для другої у бік заниження. Різниця у значеннях між моделями LE та МС у порівнянні із виміряними значеннями складає для першої секції 65 та 50 %, для другої секції 66 та 52 % відповідно у бік заниження.

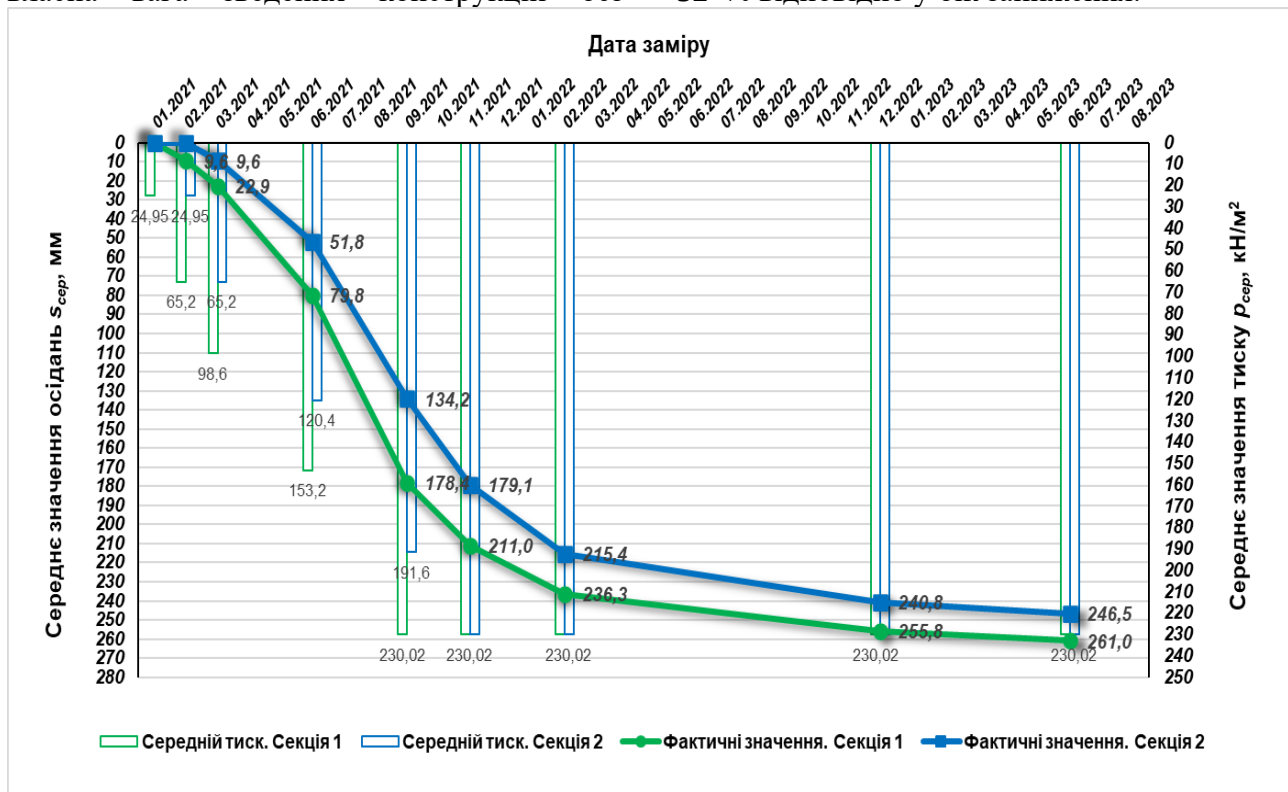


Рис. 12. Середні осідання секцій 1 та 2 від середнього тиску під підшовою плитою

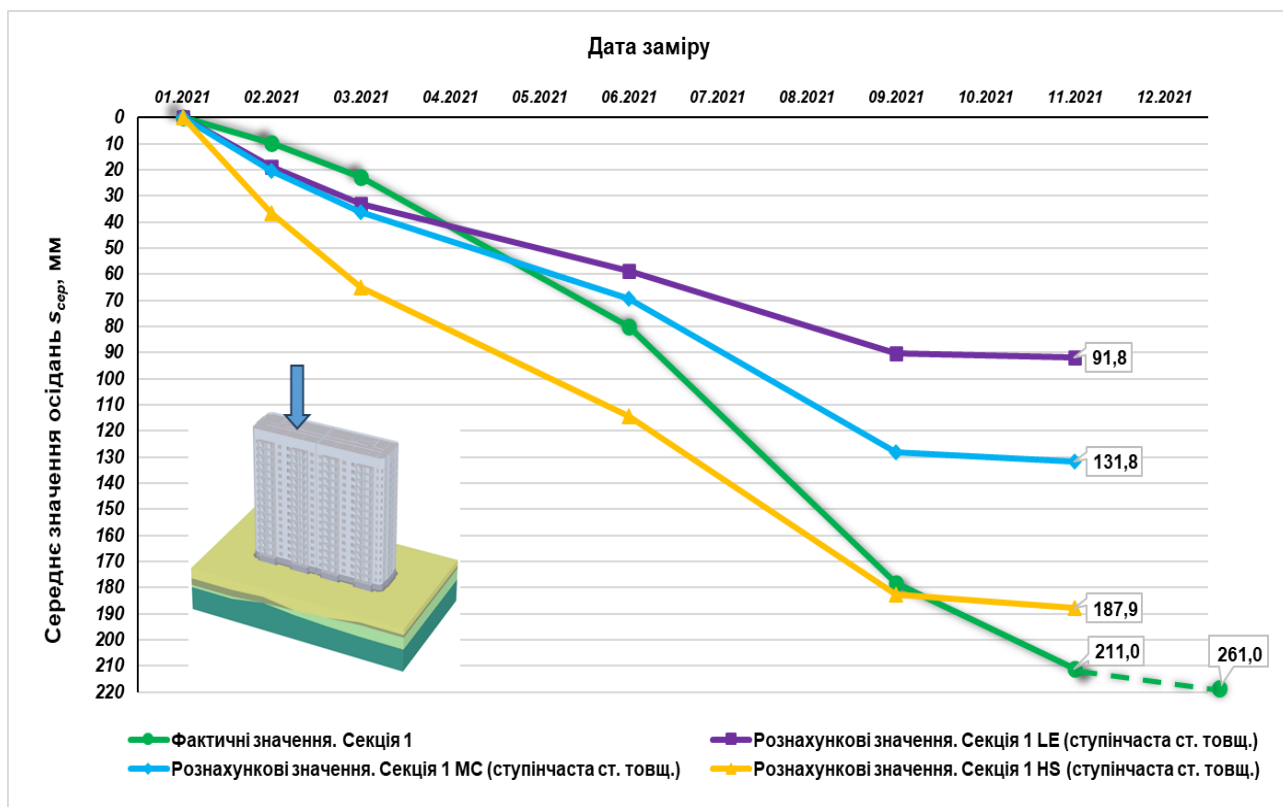


Рис. 13. Середні осідання Секції 1 у порівнянні із розрахунковими значеннями із використанням моделі ґрунтової основи із ступінчастою стисливою товщею

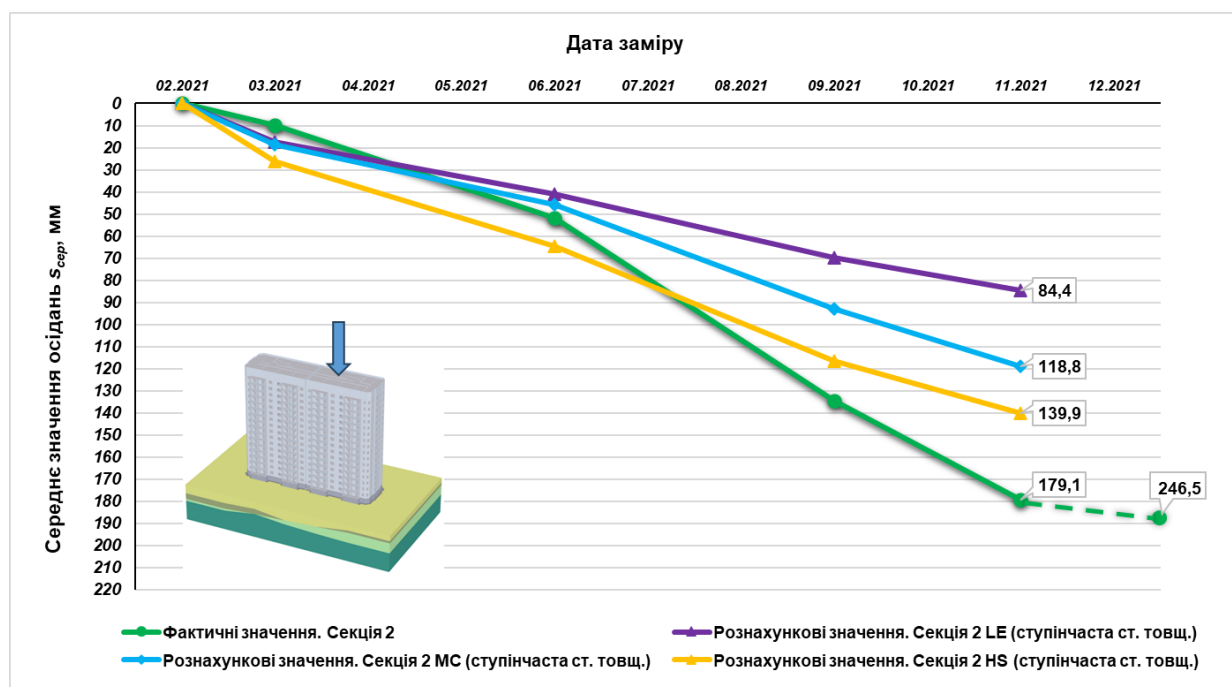


Рис. 14. Середні осідання Секції 2 у порівнянні із розрахунковими значеннями із використанням моделі ґрунтової основи із ступінчастою стисливою товщею

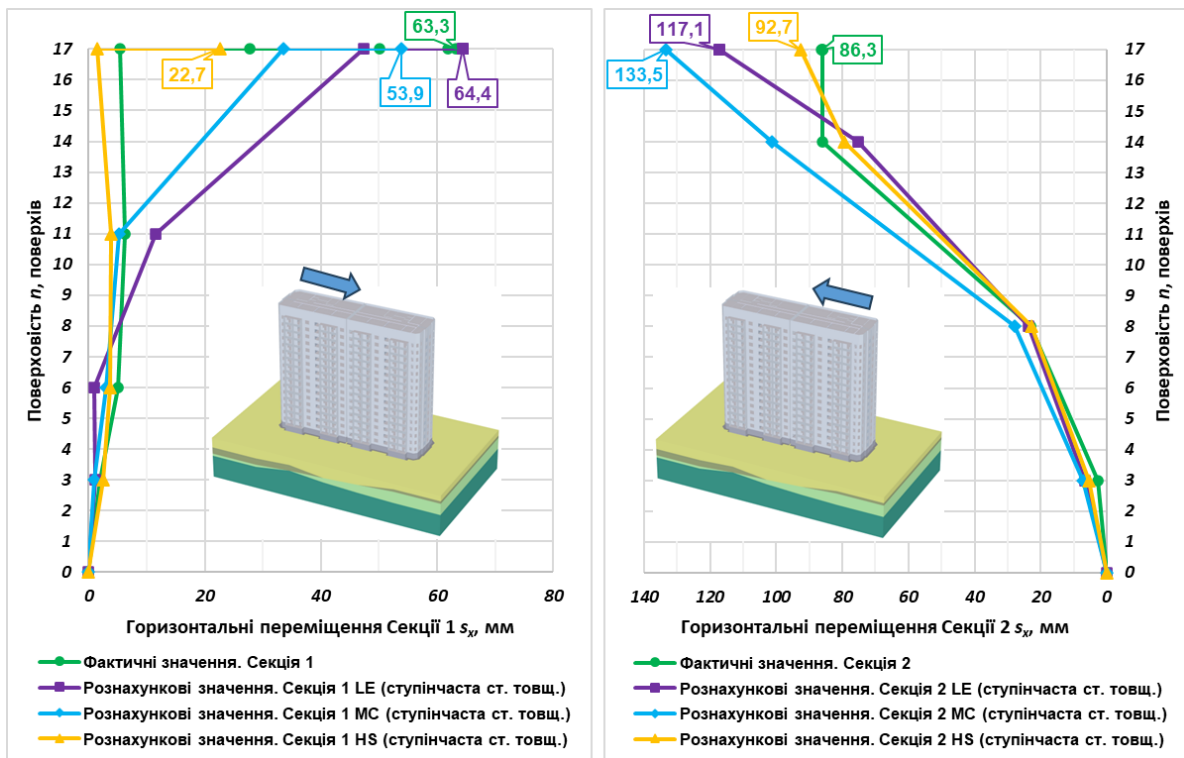


Рис. 15. Горизонтальні переміщення (нахили) секції 1 та 2 по висоті вздовж породільної вісі у порівнянні з розрахунковими значеннями із використанням моделі ґрунтової основи із ступінчастою стисливою товщцею

Аналіз горизонтальних переміщень (кренів) двох секцій на рисунку 15 показує, що найбільш точні результати для першої секції отримано із застосуванням моделей LE та MC де різниця у розрахункових та вимірних значеннях склала 2 % (LE) у бік завищення та 15 % (MC) у бік заниження відповідно, проте характер розвитку кренів не відповідає експериментальним значенням. Застосування моделі HS дає змогу найбільш точно повторити характер розвитку кренів на всіх етапах зведення будівлі, хоча різниця у розрахункових та вимірних значеннях склала 64 % у бік заниження. Для другої секції різниця склала 36 % (LE), 55 % (MC) та 7 % (HS) у бік завищення. Слід зазначити, що всі параметри моделі поведінки ґрунту HS були задані у Plaxis за замовчуванням без додаткових уточнюючих лабораторних досліджень ґрунтів, проте, навіть такий підхід дав змогу найбільш точно повторити

характер розвитку горизонтальних переміщень (кренів) кожної із секцій саме із застосуванням моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності із різними стисливими товщами.

Розвиток кренів двох секцій будівлі у напрямку одна до одної підтверджує класичні теоретичні рішення механіки суцільного середовища, тобто накладання напружень (деформацій) при взаємному впливі. Однак, з рисунку 15 чітко видно, що в процесі будівництва 2-х секцій з різницею у декілька поверхів (у даному випадку 4-ри) основний вплив проявляється саме на завершальному етапі будівництва 2-х секцій, причому впливає саме секція 2, що побудована останньою.

На рисунку 16 наведено загальний вигляд зведеної будівлі та вигляд деформаційного шва (на стику двох секцій) на завершальному етапі будівництва.



Рис. 16. Загальний вигляд будівлі та деформаційний шов на завершальному етапі будівництва

Стан деформаційного шву побічно вказує на відсутність локальних пошкоджень цегли на верхніх поверхах будівель через «взаємонавали».

Висновки

Виконано моделювання та проведено аналіз напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» із використанням найбільш розповсюджених моделей поведінки ґрунтів основи, які реалізовані у програмному комплексі Plaxis. На основі проведених спостережень за деформаціями ґрунтової основи двосекційної багатоповерхової будівлі на великорозмірних плитних фундаментах обґрунтовано застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи для розрахунку поряд розташованих різноповерхових будівель

Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити наступні висновки та рекомендації:

1. Підтверджується можливість застосування моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності із різними стисливими товщами у поєднанні із пружнопластичною моделлю поведінки

ґрунту зі зміцненням – Hardening Soil для прогнозування адекватних деформацій секційних будівель на великорозмірних плитних фундаментах, в основі яких з поверхні залягають слабкі водонасичені ґрунти.

2. Аналіз результатів моделювання у порівнянні із натурними вимірними значеннями осідань та горизонтальних переміщень (кренів) двох секцій вказує на доцільність застосування саме пружнопластичної моделі зі зміцненням ґрунту.

3. Аналіз фактичних кренів поряд розташованих фундаментів секційних будівель вказує на неможливість адекватного врахування взаємного впливу при різноповерхових будівлях з використанням моделі суцільного середовища із загальною стисливою товщею, що частково вирішується за рахунок застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності та врахування різних стисливих товщ під кожною секцією в залежності від навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лучковский И. Я. Взаимодействие конструкций с основанием. Харків : ХДАГХ (Бібліотека журналу ITE), 2000. Т. 3. 264 с.
2. Винников Ю. Л. Моделирование процессов уплотнения грунта при висесимметричному напружено-деформованому стані основ : дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.23.02. Київ, 2005. 468 с.
3. Кушнер С. Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений. Запорожье, 2008. 496 с.
4. ДБН В.2.1.-10:2018. Основи та фундаменти будівель і споруд. Чинний від 2019-01-01. Київ : Мінеріонбуд України, 2018. 36 с.
5. Lutchkovsky I. J., Samorodov O. V. Definition of the parameters of an elastic finite layer. *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburgh, Scotland, 2015. Pp. 3711–3715.
6. Самородов О. В., Табачников С. В. Заява на патент на винахід № а202301804, Україна МПК E02D 27/12. Спосіб моделювання ґрунтової основи поряд розташованих фундаментів. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Заявл. 25.04.2023.
7. Самородов О. В., Александрович В. А., Табачников С. В., Гаврилюк О. В. Вплив граничних умов на розподільчу здатність та деформативність моделі ґрунтової основи у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної ширини. *Наука та будівництво*. 2023. № 2 (36) С. 12–19.
8. Empfehlungen des Arbeitskreises «Numerik in der Geotechnik». EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (ed.). 2014. 196 p.
9. Kh. Mohd Najmu Saquib Wani, Rakshanda Showkat. Soil Constitutive Models and Their Application in Geotechnical Engineering : a Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018. Vol. 7, iss. 04. Pp. 137–145.
10. Jean-Louis Briaud Geotechnical Engineering : Unsaturated and Saturated Soils. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, US, 2013.
11. Бойко І. П., Носенко В. С. Вплив послідовності зведення суміжних секцій висотного будинку на перерозподіл зусиль у пальових фундаментах. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. : Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 4 (1). С. 54–60.
12. Носенко В. С. Напружено-деформований стан пальово-плитних фундаментів секційних висотних будинків : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02. Київ : КНУБА, 2012. 240 с.
13. Носенко В. С., Кривенко О. А. Вплив жорсткості несучих конструкцій будинку зі збірного залізобетону на напружено-деформований стан фундаментів із бурюін'єкційних паль. *Основи і фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб.* Київ : КНУБА, 2020. Вип. 40. С. 48–57.
14. Скочко Л. О., Шабалтун А. М. Вплив послідовності зведення будинків на формування напружено-деформованого стану системи «основа – фундамент – надземні конструкції». *Основи і фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб.* Київ : КНУБА, 2020. Вип. 41. С. 32–44.
15. Ter-Martirosyan Z. G. & Ter-Martirosyan A. Z. Soil beds of high-rise buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2009. № 46 (5). Pp. 165–179.
16. Braja M. D. Shallow foundations. Bearing capacity and settlements. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2017.
17. Самородов А. В. Проектирование эффективных комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий : монография. Харьков : «Типография Мадрид», 2017. 204 с.
18. PLAXIS CONNECT Edition V20. Material Models Manual. 2020. 238 с.
19. Самородов О. В., Табачников С. В., Єсакова С. В., Кротов О. В. Натурні дослідження осідань плитних фундаментів двосекційної багатоповерхової будівлі на слабких водонасичених ґрунтах. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3 (015). С. 94–101.
20. Samorodov O. V., Tabachnikov S. V., Yesakova S. V., Krotov O. V. Experience in Designing and Calculating Slab Foundations of a Two-Section Multi-story Building on Weak Water-Saturated Soils. In : Kolathayar S., Vinod Chandra Menon N., Sreekeshava K.S. (eds). *Best Practices in Geotechnical and Pavement Engineering. IACESD 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 449. Springer, Singapore, 2024. Pp. 33–43.
21. Samorodov O., Tabachnikov S. A Soil Base Model of Adjacent Various Story Structures. *Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. 18–21 June 2024, Barcelona, Spain. Scipedia, Marcos Arroyo & Antonio Gens (Eds). Vol. Field Monitoring in Geomechanics. 2024. Pp. 1144–1150.

REFERENCES

1. Luchkovsky I.Ya. *Vzaimodeystviye konstruktsey s osnovaniyem* [Interaction of structures with the base]. Kharkiv : KHDACH (Library of the ITA journal), 2000, vol. 3, 264 p. (in Russian).
2. Vynnykov Yu.L. *Modelyuvannya protsesiv ushchilnennya hruntu pry visesymetrychnomu napruzhenodeformovanomu stani osnov* [Modeling soil compaction processes in the axisymmetric stress-strain state of bases]. (Doctoral dissertation, specialization 05.23.02). 2005, Kyiv, 468 p. (in Ukrainian).

3. Kushner S.G. *Raschet deformatsiy osnovaniy zdaniy i sooruzheniy* [Calculation of deformations of the foundations of buildings and structures]. 2008, Zaporizhzhia, 496 p. (in Russian).
4. DBN V.2.1.-10:2018. (2018). *Osnovy ta fundamenti budivel' i sporud* [DBN V.2.1.-10:2018. Bases and foundations of buildings and structures]. Valid from 2019–01–01. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 36 p. (in Ukrainian).
5. Lutchkovsky I.J. and Samorodov O.V. Definition of the parameters of an elastic finite layer. Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. 2015, pp. 3711–3715.
6. Samorodov O.V. and Tabachnykov S.V. *Zayava na patent na vynakhid № a202301804, Ukrayina MPK E02D 27/12. Sposib modelyuvannya hruntovoyi osnovy poryad roztashovanykh fundamentiv* [Application for a patent for an invention No. a202301804, Ukraine IPC E02D 27/12. The method of modeling the soil base near the foundations located]. Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov. Filed 25.04.2023. (in Ukrainian).
7. Samorodov O.V., Alexandrovich V.A., Tabachnykov S.V. and Havryliuk O.V. *Vplyv hranychnykh umov na rozpodilchu zdarnist ta deformatyvnist modeli gruntovoyi osnovy u vyhlyadi liniyno-deformovanoho sharu skinchennoi shyryny* [The influence of boundary conditions on the distribution capability and deformability of the model of the soil base in the form of a linearly deformed layer of finite width]. *Nauka ta budivnytstvo* [Science and Construction]. 2023, no. 2 (36), pp. 12–19. (in Ukrainian).
8. Empfehlungen des Arbeitskreises “Numerik in der Geotechnik” – EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Ed.). 2014, 196 p.
9. Kh Mohd Najmu Saquib Wani and Rakshanda Showkat. Soil Constitutive Models and Their Application in Geotechnical Engineering : a Review. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2018, no. 7 (04), pp. 137–145.
10. Briaud J-L. Geotechnical Engineering : Unsaturated and Saturated Soils. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc. 2013.
11. Boyko I.P. and Nosenko V.S. *Vplyv poslidovnosti zvedennya sumizhnykh sektiiv vysotnoho budynku na pererozpodil zusyly u palovykh fundamentakh* [The influence of the sequence of construction of adjacent sections of a high-rise building on the redistribution of forces in pile foundations]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya : Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo* [Collection of scientific papers of Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk. Series : Industrial Engineering, Construction]. 2012, no. 1, pp. 54–60. (in Ukrainian).
12. Nosenko V.S. *Napruzheno-deformovany stan paljovo-plytnykh fundamentiv sekcijnykh vysotnykh budynkiv* [Stress-strain state of plate-pile foundations of sectional high-rise buildings]. Doctoral dissertation, specialization 05.23.02. Kyiv : KNUBA Publ., 2012, 240 p. (in Ukrainian).
13. Nosenko V.S. and Krivenko O.A. *Vplyv zhorstkosti nesuchykh konstruksiy budynku zi zbirnoho zalizobetonu na napruzhenno-deformovany stan fundamentiv iz buroinyektsiynykh pal* [The influence of the stiffness of the bearing structures of a precast concrete building on the stress-strain state of foundations made of augercast piles]. *Osnovu i fundamenti: Mizhvidomchyj nauko-tekhnichnyj zbirnyk*, 2020, no. 40, pp. 48–57. (in Ukrainian).
14. Skochko L. and Shabaltun A. *Vplyv poslidovnosti zvedennya budynkiv na formuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu systemy «osnova-fundament-nadzemni konstruksiyi* [The influence of the sequence of building construction on the formation of the stress-strain state of the base-foundation-superstructures system]. *Osnovu i fundamenti : mizhvidomchyj nauko-tekhnichnyj zbirnyk* [Fundamentals and Foundations : interdisciplinary scient. and tech. coll.]. 2020, no. 41, pp. 32–44. (in Ukrainian).
15. Ter-Martirosyan Z.G. and Ter-Martirosyan A.Z. Soil beds of high-rise buildings. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2009, no. 46 (5), pp. 165–179.
16. Braja M.D. Shallow foundations. Bearing capacity and settlements. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2017.
17. Samorodov A.V. *Proektirovanie effektivnykh kombinirovannykh svainykh i plitnykh fundamentov mnogoetazhnykh zdaniy* [Design of effective combined pile and raft foundations of multi-storey buildings]. Kharkiv : Madrid Printing House, 2017, 204 p. (in Russian).
18. PLAXIS CONNECT Edition V20. Material Models Manual. 2020, 238 p.
19. Samorodov O.V., Tabachnikov S.V., Yesakova S.V. and Krotov O.V. *Naturni doslidzhennia osidan plytnykh fundamentiv dvosektsiinoi bahatopoverkhovoi budivli na slabkykh vodonasychenykh hruntakh* [Field Studies of Settlements of Slab Foundations of a Two-section Multi-storey Building on Weak Water-saturated soils]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 3 (015), pp. 94–101. (in Ukrainian).
20. Samorodov O.V., Tabachnikov S.V., Yesakova S.V., Krotov O.V. Experience in Designing and Calculating Slab Foundations of a Two-Section Multi-story Building on Weak Water-Saturated Soils. In : Kolathayar S., Vinod Chandra Menon N., Sreekesava K.S. (eds). Best Practices in Geotechnical and Pavement Engineering. IACESD 2023. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 449. Springer, Singapore, 2024, pp. 33–43.
21. Samorodov O. and Tabachnikov S. A Soil Base Model of Adjacent Various Story Structures. Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. 18–21 June 2024. Barcelona, Spain. Scipedia, Marcos Arroyo & Antonio Gens (Eds). Vol. Field Monitoring in Geomechanics, 2024, pp. 1144–1150.

Надійшла до редакції: 13.09.2024.

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.25.1107

ДО ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТИЧНИХ УМОВ ТА БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРИ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ЖЕЛЕЗНЯКОВ Є. О.^{2*}, *асп.*

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 045-51-22, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6124-201X

Анотація. Питання забезпечення умов мікроклімату приміщень будівель та споруд в холодну пору року мають виняткову важливість, оскільки вони є основою забезпечення безпеки життєдіяльності та здоров'я людей. Аварійні ситуації та значні порушення теплового режиму в приміщеннях і будівлях невизначений час погіршують умови мікроклімату, аж до досягнення його параметрами граничних значень, небезпечних для життя людей. Особливу актуальність ці питання отримують в умовах зростання в Україні чисельності аварійних ситуацій в системах теплопостачання, як внаслідок високого рівня зношеності їх інфраструктури загалом, так і надзвичайних ситуацій воєнного часу. Тому, проведення досліджень із забезпечення безпеки експлуатації систем теплопостачання при аварійних відключеннях через визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання із урахуванням просторового розташування приміщень в будівлях та їх конструктивних особливостей є актуальною задачею. **Мета статті** – теоретичні дослідження ризику досягнення критичних умов мікроклімату при аварійних ситуаціях у системах теплопостачання із урахуванням просторового розташування приміщень всередині будівель та споруд і конструктивних особливостей будівель. **Висновок.** Визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання необхідні для дослідження змін параметрів мікроклімату приміщень житлових будівель, котрі викликані аварійними відключеннями систем теплопостачання.

Ключові слова: аварійні відключення; мікроклімат; зовнішні кліматичні умови; конструктивні особливості; критичні умови мікроклімату

ON THE ISSUE OF RESEARCHING CRITICAL CONDITIONS AND OPERATIONAL SAFETY OF HEAT SUPPLY SYSTEMS DURING EMERGENCY HEAT SUPPLY SHUTDOWNS

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.) , Prof.*,
ZHELEZNYAKOV Ye.O.^{2*}, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Life Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Life Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 045-51-22, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6124-201X

Abstract. The issues of ensuring the microclimate conditions of the premises of buildings and structures in the cold season are of exceptional importance, as they are the basis of ensuring the safety of life and people's health. Emergency situations and significant violations of the thermal regime in premises and buildings for an indefinite period of time worsen the conditions of the microclimate, until its parameters reach extreme values dangerous for human life. These issues are particularly relevant in the context of the growing number of emergency situations in heat supply systems in Ukraine, both due to the high level of wear and tear of their infrastructure in general, and wartime emergencies. Therefore, conducting research to ensure the safety of operation of heat supply systems during emergency shutdowns by

determining the regularities of temperature changes in rooms, reaching the critical temperature and operating time of heat supply systems, taking into account the spatial location of rooms in buildings and their design features, is an urgent task. **The purpose of the article.** Theoretical studies of the risk of reaching critical microclimate conditions in emergency situations in heat supply systems, taking into account the spatial arrangement of premises inside buildings and structures and structural features of buildings. **Conclusion.** Determining the regularities of temperature changes in the premises, reaching the critical temperature and operating time of heat supply systems are necessary for the study of changes in the microclimate parameters of the premises of residential buildings, which are caused by emergency shutdowns of heat supply systems. On the basis of the conducted research, the regularities of the structural features of buildings and structures in emergency situations in heat supply systems to ensure microclimate conditions in the premises have been determined.

Keywords: *emergency shutdown; microclimate; external climatic conditions; structural features; critical microclimate conditions*

Актуальність. Питання забезпечення умов мікроклімату житлових будівель в холодну пору року мають виняткову важливість, оскільки вони – основа підтримання безпеки життєдіяльності та здоров'я людей. Особливо в умовах зростання в Україні чисельності аварійних ситуацій в системах теплопостачання, як внаслідок високого рівня зношеності їх інфраструктури загалом, так і надзвичайних ситуацій воєнного часу. Як свідчить статистика та дослідження інфраструктура систем життєзабезпечення (теплопостачання, газопостачання, електропостачання, водопостачання та водовідведення) в Україні перебувала в критичному стані ще протягом мирного часу. Триваючі й досі військові дії завдають інфраструктурі систем життєзабезпечення ще більшої шкоди.

Визначені обставини перешкоджають підтриманню нормального стану здоров'я та життєдіяльності населення, можуть призвести до непоправних порушень та руйнування систем життєдіяльності об'єктів із подальшим створенням надзвичайних ситуацій, через вихід систем теплопостачання з ладу.

Таким чином, актуальною задачею сьогодення є проведення досліджень із підтримання безпеки експлуатації систем теплопостачання при аварійних відключеннях за допомогою визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання із урахуванням просторового розташування приміщень в

будівлях та їх конструктивних особливостей.

Постановка проблеми. На сучасному етапі проведення досліджень умов мікроклімату приміщень вимагає обов'язкового врахування впливу просторового розташування приміщень будівлі та дії зовнішніх кліматичних факторів.

Експлуатаційна практика свідчить, що значними температурними коливаннями внутрішнього повітря відрізняються кутові приміщення та такі, що мають велику площу зовнішніх огорожувальних конструкцій. Внаслідок впливу значних температурних коливань в таких приміщеннях спостерігається погіршення самопочуття людей [16–19]. Тому проведення досліджень та визначення температури внутрішнього повітряного середовища $t_{\text{в}}$, °C є значною проблемою сьогодення [1–3].

Мета дослідження. Провести теоретичні дослідження досягнення критичних умов мікроклімату при аварійних ситуаціях у системах теплопостачання із урахуванням просторового розташування приміщень всередині будівель та споруд і конструктивних особливостей будівель.

Результати досліджень. Мікроклімат приміщень можна визначити, як стан внутрішнього середовища обмеженого простору, що здійснює значний вплив на продуктивність, здоров'я та відчуття комфорту людини. Вологість, рухливість повітря, температура повітря та температура огорожувальних конструкцій – його характерні параметри [13–15].

Оптимальні та допустимі значення параметрів мікроклімату формуються під впливом просторового розташування приміщення всередині будівлі, теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій та дії зовнішніх кліматичних факторів [5; 8; 17]. Для забезпечення необхідних умов мікроклімату приміщень будівель і споруд у зимовий період передбачена робота систем теплопостачання.

Однак, фізична деградація інженерних комунікацій, зниження теплового опору будівель різного призначення, призводить до переохолодження будівель та споруд внаслідок аварій, дефіцитних ситуацій і неполадок в системах теплопостачання протягом опалювального періоду.

Загальний аналіз останніх відкритих даних стосовно передвоєнного стану об'єктів системи теплопостачання України демонструє ситуацію близьку до катастрофічної (табл.).

Таблиця

Показники зносу об'єктів системи теплопостачання України

Показник, %	Значення
Частка енергоблоків теплоелектростанцій (ТЕС), які відпрацювали розрахунковий ресурс (100 тис. годин)	92,1
Частка енергоблоків ТЕС, що підтримуються у працездатному стані	80
Частка енергоблоків ТЕС, які відпрацювали граничний ресурс (потребують модернізації чи заміни)	63,8
Частка теплових мереж із строком експлуатації більше 20 років	50
Частка котелень, які відпрацювали нормативний термін	60
Частка малоефективних та застарілих котлів з низьким ККД	38
Частка теплових пунктів в аварійному стані	40
Частка аварійних тепломереж	15,8
Частка оснащення житлового фонду приладами обліку	35
Частка житлових будинків, які потребують капітального ремонту	40

Початок бойових дій завдав ще більшої шкоди інфраструктурі систем теплопостачання України.

Таким чином безпосереднім наслідком деградації та руйнації інфраструктури системи теплопостачання України є чисельні аварійні відключення, котрі призводять до виникнення в приміщеннях житлових будівель таких дискомфортних умов, котрі прямо порушують вимоги санітарних норм [16; 17] та становлять загрозу для здоров'я та життєдіяльності мешканців. Разом із тим у випадках коли аварійне відключення призводить до тривалого простою в результаті досягненні повітрям в приміщенні значення 8 °С і нижче, системи теплопостачання можуть зазнати додаткових пошкоджень та вимагати значних матеріальних витрат на відновлення.

Відповідно до [14], високий рівень якості параметрів внутрішнього середовища приміщень збільшує продуктивність виконання робіт, здатність до навчання та сприйняття інформації, в той же час відсутність відчуття комфорту спонукає людину вживати різноманітних заходів щодо поліпшення ситуації зі станом мікроклімату, що зазвичай веде до додаткових витрат енергії, іноді досить значних.

Параметри мікроклімату в приміщеннях будівель визначаються не тільки роботою систем опалення та вентиляції, а й теплофізичними характеристиками огорожувальної конструкції. Значну роль відіграє вибір будівельних матеріалів огорожень, а саме їх теплотехнічні показники – коефіцієнти теплопровідності, теплозасвоєння та паропроникнення та залежні від них загальний термічний опір і теплотривкість огорожень.

Навколишнє середовище має вплив на параметри мікроклімату через зовнішні огороження (рис.). Визначаючи значення параметрів мікроклімату, необхідно враховувати такі зовнішні умови, як температура зовнішнього повітря, напрям вітру, сонячну радіацію, опади та відносну вологість повітря. Ці фактори

непередбачувані, особливо, якщо поєднуються один з одним.

Знаючи кліматичні характеристики районі забудови і теплоакумуляцію зовнішніх огорожень, «можна оптимізувати кількість і якість теплової енергії, необхідної для підтримки оптимальних параметрів мікроклімату» [4–6].

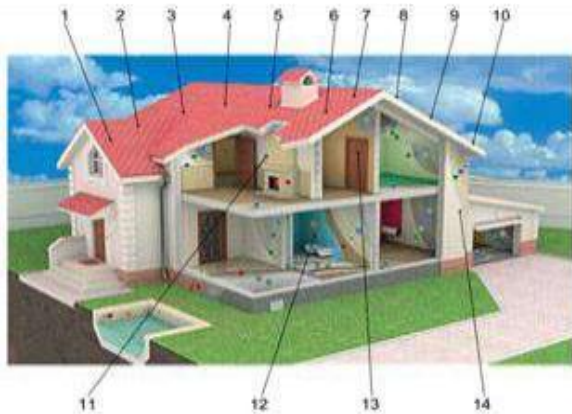


Рис. Вплив зовнішніх факторів на мікроклімат приміщень у процесі взаємодії з внутрішнім середовищем робочих місць: 1 – роза вітрів; 2 – інсоляція вдень; 3 – нічний час; 4 – дощ і вологість; 5 – хмарність; 6 – температура зимова; 7 – температура річна; 8 – швидкість вітру; 9 – матеріал будівельних конструкцій; 10 – стан поверхні зовнішнього боку будівельних конструкцій; 11 – температура всередині приміщення; 12 – оптимальна вологість усередині; 13 – подається кількість тепла всередину приміщення; 14 – теплова активність будівельних конструкцій [2]

Встановлено, що якість та кількість теплової енергії, котра необхідна для підтримки всередині будівлі оптимальних параметрів мікроклімату, можливо оптимізувати у випадку, коли теплоакумулювальна здатність огорожувальних конструкцій та характер впливу зовнішнього середовища та є величинами відомими [4–6].

В результаті досліджень [2; 3; 11] встановлено, що при забезпеченні нормативного значення повітрообміну приміщень за рахунок зовнішнього повітря в будівлях підтримуються такі вологість і рухливість внутрішнього повітря, які не змінюють визначального впливу температурних показників на теплові умови. Тому при розрахунках забезпеченості теплового режиму можна враховувати тільки температурний фактор мікроклімату.

Висновки

Визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання необхідні для дослідження змін параметрів мікроклімату приміщень житлових будівель, котрі викликані аварійними відключеннями систем теплопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беликов А. С., Кожушко А. П., Сафонов В. В. Охрана труда на предприятиях строительной индустрии. Днепропетровск : ЧП Федоренко А. А., 2010. 528 с.
2. Грудзинский М. М., Ливчак В. Н., Поз М. Я. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
3. Губернский Е. Д., Корневская Е. И. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий. Москва : Медицина, 1978. 192 с.
4. Данилов М. П., Ветвицкий И. Л., Чесанов Л. Г., Колесник И. А. Теплоустойчивость зданий в экосистеме «Окружающая среда – здание – человек» (аварийно-дефицитные тепловые режимы, гелио- и ветровые аспекты). Днепропетровск : «Поліграфіст», 2005. 263 с.
5. Ветвицкий И. Л., Каспийцева В. Ю., Колесник И. А., Шевченко А. А. Исследование влияния теплопроводных включений на параметры микроклимата помещений при отключении системы отопления. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2013. Вып. 70. С. 65–69.
6. Беликов А. С., Колесник И. А., Рагимов С. Ю., Маладыка И. Г., Вовк Д. В. Исследование влияния теплопроводных включений на микроклимат помещений при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 98. С. 20–24.
7. Стрежекуров Э. Е., Гашко С. В. Исследование терморadiационной напряженности в горячих цехах металлургического производства. *Гигиена и санитария*. 1980. Вып. 9. С. 62–64.
8. Табунчиков Ю. А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации. *АВОК*. 2005. № 4. С. 4–7.
9. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. 278 с.

10. Шкловер А. М., Васильев В. Ф., Ушаков Ф. В. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
11. Arseniy Sleptsov, Alexander Ryzhov, Ilya Luchnikov, Ashkan Haji-Hosseini, Henni Ouerdane, Aldo Bischi. Controlled adjustments of indoor microclimate parameters for building's energy demand management. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721004029> (дата звернення : 01.09.2023).
12. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. (Державні будівельні норми України). URL : <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>
13. ДСТУ Б EN ISO 7730. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=28002
14. ДСТУ Б EN 15251. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28004
15. Кононович Ю. В. Тепловой режим зданий массовойстройки. Москва : Стройиздат, 1986. 158 с.
16. Veronica Lucia Castaldo, Ilaria Pigliautile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello, Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants : a case study in central Italy. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
17. Kostantinos Gobakis, Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed : 01 September 2020).
18. Braian M. Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito, Carlos G. Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

REFERENCES

1. Bielikov A.S., Kozhushko A.P. and Safonov V.V. *Okhrana truda na predpriyatiyakh stroitel'noy industrii* [Protection of labour on the enterprises of build industry]. Dnipropetrovsk : PE Fedorenko A.A. Publ., 2010, 528 p. (in Russian).
2. Grudzynsky M.M., Livchak V.N. and Poz M.Ya. *Otopstello-ventilyatsionnye sistemy zdaniy povyshennoy etazhnosti* [Heating-ventilation systems of buildings of the promoted floor]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982, 256 p. (in Russian).
3. Gubernsky Ye.D. and Korenevskaya Ye.I. *Gigiyenicheskiye osnovy konditsionirovaniya mikroklimata zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Hygienic bases of conditioning of microclimate of dwelling and public buildings]. Moscow : Medicine Publ., 1978, 192 p. (in Russian).
4. Danilov M.P., Vetrovskiy I.L., Chesanov L.G. and Kolesnik I.A. *Teplovaya ustoychivost' zdaniy v ekosisteme "Sreda – zdaniye – chelovek"* (avariyno-defitsitnyye teplovyye rezhimy, solnechnyy i vetrovoy aspekty) [Thermal stability of buildings in the ecosystem "Environment – building – man" (emergency-deficient thermal regimes, solar and wind aspects)]. Dnipro : "Poligrafist" Publ., 2005, 263 p. (in Russian).
5. Vetrovskiy I.L., Kaspiytseva V.Yu., Kolesnik I.A. and Shevchenko A.A. *Issledovanie vliyaniya teploprovodnykh vkluyucheni na parametry mikroklimata pomeshchenii pri otkluyucheni sistemy otopleniya* [Investigation of the influence of heat-conducting inclusions on the parameters of the microclimate of premises when the heating system is turned off]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2013, iss. 70, pp. 65–69. (in Russian).
6. Bielikov A.S., Kolesnik I.A., Ragimov S.Yu., Maladyka I.G. and Vovk D.V. *Issledovaniye vliyaniya teploprovodnykh vkluyucheni na mikroklimat pomeshchenii pri avariynnykh situatsiyakh v sistemakh teplosnabzheniya* [Study of the influence of heat-conducting inclusions on the microclimate of premises in emergency situations in heat supply systems]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2017, iss. 98, pp. 20–24. (in Russian).
7. Strezhekurov E.Ye. and Gashko S.V. *Issledovaniye termoradiatsionnoy napryazhennosti v goryachikh tsekhakh metallurgicheskogo proizvodstva* [Investigation of thermo-radiation stress in hot shops of metallurgical production]. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 1980, iss. 9, pp. 62–64. (in Russian).
8. Tabunshchikov Yu.A. *Stroitel'nyye kontseptsii zdaniy KHKH veka v oblasti teplosnabzheniya i klimatizatsii* [Construction concepts for buildings of the XXI century in the field of heat supply and air conditioning]. *Sbornik nauchnykh rabot ABOK* [Academic Journal ABOK]. 2005, iss. 4, pp. 4–7. (in Russian).
9. Borkhert R. and Yubits V. *Tekhnika infrakrasnogo nagreva* [Infrared heating technique]. Moscow : Gosenergoizdat Publ., 1963, 278 p. (in Russian).

10. Shklover A.M., Vasil'yev V.F. and Ushakov F.V. *Osnovy stroitel'noy teplotekhniki zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Fundamentals of building heat engineering for residential and public buildings]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982, 156 p. (in Russian).
11. Arseniy Sleptsov, Alexander Ryzhov, Ilia Luchnikov, Ashkan Haji-Hosseinloo, Henni Ouerdane and Aldo Bischi. Controlled adjustments of indoor microclimate parameters for building's energy demand management. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721004029> (Accessed : 01 September 2023).
12. *DBN V.2.5-67:2013. Opalennya, ventylyatsiya ta kondytsionuvannya* [SCN V.2.5-67:2013. Heating, ventilation, air conditioning]. Valid from 2013-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2013. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
13. *DSTU B EN ISO 7730. Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analychne vyznachennya ta interpretatsiya teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriyiv lokal'noho teplovoho komfortu* [DSTU B EN ISO 7730. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria]. Valid from 2012-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
14. *DSTU B EN 15251. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen' dlya proektuvannya ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel' po vidnoshenni do yakosti povitrya, teplovoho komfortu, osvittlennya ta akustyky* [DSTU B EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics]. Valid from 2012-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
15. Kononovich Yu.V. *Teplovoy rezhim zdaniy massovoy zastroyki* [Infrared heating technique]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1986, 158 p. (in Russian).
16. Veronica Lucia Castaldo, Ilaria Pigliautile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello and Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants : a case study in central Italy. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
17. Kostantinos Gobakis and Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed : 01 September 2020).
18. Braian M. Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito and Carlos G. Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

Надійшла до редакції: 15.10.2024.

УДК 504:340.13

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.31.1108

ЗАКОНОДАВЧЕ ВРЕГУЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ НА РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ КОЛИШНЬОГО УРАНОВОГО ВИРОБНИЦТВА

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КАПЛЯ О. І.², *канд. техн. наук, доц., полковник*,
КАПЛЯ І. О.³, *ад'юнкт, полковник*,
ПИЛИПЕНКО О. В.^{4*}, *канд. техн. наук, доц.*

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

² Заступник генерального директора, керівник Навчального центра державного підприємства «38 відділ інженерно-технічних частин», пр. Аношкіна, 159, 49000, Кам'янське, Україна, тел. +38 (067) 633-16-80, e-mail: kaplia.50@ukr.net, ORCID ID: 0009-0008-4548-0913

³ Ад'юнкт Національного університету оборони України, 01001, Київ, Україна, тел. +380 (67) 527-88-65 e-mail: kaplia1607@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1424-4175

^{4*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9644-3118

Анотація. Постановка проблеми. У зв'язку з веденням бойових дій на території Дніпропетровської області та на інших територіях України підприємства ядерно-паливного комплексу постійно стикаються з екологічними небезпеками, що можуть принести обстріли та бомбування. На ряду з цим є можливість проведення терористичних актів на радіаційно-небезпечних об'єктах чи на енергетичних об'єктах України. В зв'язку з тим, що промислові майданчики колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» знаходяться досить близько до лінії бойового зіткнення, це призводить до підвищення небезпек та ризиків виникнення екологічної аварії з викидом радіаційних речовин. **Мета статті** полягає в аналізі існуючих нормативно-правових актів, які забезпечують стабільне нормативне, організаційне та технологічне функціонування таких радіаційно-небезпечних об'єктах як промислові майданчики та окремі хвостосховища (шламонакопичувачі) на прикладі колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ». Визначити можливість нормативно-правового застосовування експрес-методів реєстрації радіаційного забруднення методом дистанційного збору даних та математичного моделювання на радіаційно-забруднених територіях, якщо має місце техногенна чи військова надзвичайна ситуація. **Висновки.** У ході аналізу загроз для радіаційно-небезпечних об'єктів (РНО) що розташовані в Дніпропетровській області визначено, що основну загрозу становлять техногенні промислові чи військові аварії на РНО з викидом радіоактивних речовин в атмосферу, літосферу та гідросферу. З початком повномасштабної війни РФ проти України, ворогом було захоплено дві атомні електростанції: Чорнобильську АЕС Київській області та Запорізьку АЕС в Запорізькій області. Саме тому необхідно визначити, які дії необхідно докласти щоб виконати вимоги нормативно-правових документів і актів держави в умовах постійних загроз та небезпек в умовах військової агресії. Також необхідно визначити та розрахувати екологічні наслідки можливої техногенної аварії чи обстрілу в умовах діючого підприємства, яке виконує охорону, фізичний захист та вихідний дозиметричний контроль радіаційно-ядерних об'єктів.

Ключові слова: *нормативно-правовий документ; екологічна небезпека; ядерно-паливний комплекс; екологічні наслідки; енергетика; захват об'єкту; терористичний акт*

LEGISLATIVE REGULATION OF ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN THE RADIOACTIVE-CONTAMINATED TERRITORY OF THE FORMER URANIUM PRODUCTION

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.) , Prof.*,
KAPLIA O.I.², *Cand. Sc. (Tech.), Colonel*,
KAPLIA I.O.³, *Adjunct, Colonel*,
PYLYPENKO O.V.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

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

² Deputy Director General, Head of the State Enterprise Training Center "38 Department of Engineering Technical Units", 159, Anoshkin Ave., Kamianske, 49000, Ukraine, tel. +38 (067) 633-16-80, e-mail: kaplia.50@ukr.net, ORCID ID: 0009-0008-4548-0913

³ Adjunct of the National Defense University of Ukraine, Kyiv, 01001, Ukraine, tel. +380 (67) 527-88-65, e-mail: kaplia1607@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1424-4175

^{4*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9644-3118

Abstract. Problem statement. In connection with the conduct of hostilities in the territory of the Dnipropetrovsk region and in other territories of Ukraine, the enterprises of the nuclear fuel complex are constantly faced with environmental dangers that can bring shelling and bombing. Along with this, there is the possibility of carrying out terrorist acts at radiation-hazardous facilities or at energy facilities of Ukraine. In connection with the fact that the industrial sites of the former uranium production of the "PCH" industrial complex are located quite close to the line of combat, this leads to an increase in the dangers and risks of an environmental accident with the release of radioactive substances. **The purpose of the article** is to analyze the existing regulatory and legal acts that ensure stable regulatory, organizational and technological functioning of such radiation-hazardous facilities as industrial sites and separate tailings storage facilities (sludge impoundments) using the example of the former uranium production of the "PCH" industrial complex. Determine the possibility of regulatory and legal application of express methods of registration of radiation pollution by the method of remote data collection and mathematical modeling in radiation-contaminated territories, if there is a man-made or military emergency. **Conclusion.** During the analysis of threats to radiation-hazardous objects located in the Dnipropetrovsk region, it was determined that the main threat is man-made industrial or military accidents at RHO with the release of radioactive substances into the atmosphere, lithosphere and hydrosphere. Since the beginning of the full-scale war of the Russian Federation against Ukraine, the enemy has captured two nuclear plants: the Chornobyl nuclear power plant in the Kyiv region and the Zaporizhzhia nuclear power plant in the Zaporizhzhia region. That is why it is necessary to determine what actions need to be taken in order to fulfill the requirements of regulatory and legal documents and acts of the state in the conditions of constant threats and dangers in the conditions of military aggression. In accordance with the actions, it is also necessary to determine and calculate the environmental consequences of a possible man-made accident or military shelling in the conditions of an operating enterprise that performs security, physical protection and radiation monitoring of the RHO.

Keywords: normative legal document; ecological danger; nuclear fuel complex; ecological consequences; energy industry; delict of the object; terrorist act

Постановка проблеми. Питання законодавчого врегулювання екологічних проблем на радіоактивно-забруднених територіях колишнього уранового виробництва виробничого об'єднання «Прийдніпровський хімічний завод» (ВО «ПХЗ») регулярно постає протягом останніх 20 років. Підприємства ядерно-паливного комплексу України впираються в своїй діяльності на нормативно-правову базу що діє на території нашої держави: Конституція України, Кодекси та Закони України.

Аналіз публікацій. Підприємства, що створені в результаті реструктуризації ВО «ПХЗ» і державне підприємство 38 ВІТЧ (ДП «38 ВІТЧ») спираються в своїй роботі на державні стратегії, що визначають мету та задачі функціонування підприємств на певний період часу, згідно сталого розвитку

держави. Так до 2023 року в Україні діяла енергетична стратегія до 2035 року [1], яка в серпні 2023 року була замінена на нову енергетичну стратегію України на період до 2050 року [2]. Сама Енергетична стратегія України до 2035 р. передбачала три етапи її реалізації: 1 етап, це реформування енергетичного сектору (до 1 грудня 2020 р.); 2 етап – оптимізація та інноваційний розвиток інфраструктури (до 1 грудня 2025 р.); 3 етап планувався як забезпечення сталого розвитку (до 1 грудня 2035 р.).

Однак в зв'язку з повномасштабним вторгненням військ РФ в Україну стратегія [1] втратила чинність і вступила в дію розроблена нова енергетична стратегія [2], що актуалізували план дій щодо екологічної безпеки до 2050 року. Також ВО «ПХЗ» та ДП «38 ВІТЧ» спираються в своїй діяльності на державні, національні та

регіональні програми щодо питань екологічної та радіаційної безпеки Дніпропетровської області. Програми [3–8], які діяли в різні роки, мали на меті врегулювати нормативно-правові, організаційні, адміністративні та економічні питання на законодавчому рівні. Однак фінансування цих програм, із-за бойових дій на сході, було частково скорочене і тому кошти спрямовані на забезпечення безпеки та мінімізації ризиків від техногенно-підвищених джерел природного походження (ДІВ) змогли лише утримувати радіаційно-небезпечні об'єкти із забезпеченням мінімальних вимог до екологічної ситуації підприємства, міста та області.

Мета дослідження полягає в аналізі існуючих нормативно-правових актів, які забезпечують стабільне нормативне, організаційне та технологічне функціонування таких радіаційно-небезпечних об'єктів (РНО), як промислові майданчики та окремі хвостосховища (шламонакопичувачі) на прикладі колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ». Визначити можливість нормативно-правового застосовування експрес-методів реєстрації радіаційного забруднення методом дистанційного збору даних та математичного моделювання на радіаційно-забруднених територіях, якщо має місце надзвичайна ситуація техногенного чи воєнного характеру [9].

Результати досліджень. Підприємство ДП «38 ВІТЧ» протягом 20 років, сумлінно та відповідально виконує покладені на нього державою функції охорони, фізичного захисту, радіаційного контролю та моніторингу підпорядкованих об'єктів, що несуть загрозу радіаційного забруднення. За цей же час було намагання вивести з під охорони та фізичного захисту певні окремі комплекси, виробництва чи навіть цілі промислові майданчики, що в свою чергу могло призвести до неконтрольованого обігу радіаційних речовин, матеріалів, металобрухту та деякої продукції. За двадцять років, в період з 2005 року і по 2024 рік, приватні організації та фірми

намагалися неодноразово змінити успішно діючу систему безпеки на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ», але це не мало результату.

З самого початку здійснення заходів по виводу з експлуатації даного уранового виробництва в 1991 році були допущені відступи і порушення діючого законодавства України.

В Постанові № 188/98-ВР [6], встановлено, що «відповідно до ст. 16 Конституції України, якою визначено, що забезпечення екологічної безпеки і підтримання екологічної рівноваги на території України, подолання наслідків Чорнобильської катастрофи, катастрофи планетарного масштабу, збереження генофонду українського народу є обов'язком держави».

Даною постановою [6], екологічну ситуацію в Україні було охарактеризовано «як кризову, що формувалася протягом тривалого періоду через нехтування об'єктивними законами розвитку і відтворення природо-ресурсного комплексу України».

У розділах І.2 та І.18, цієї Постанови, чітко визначено шляхи забезпечення екологічної безпеки в енергетиці та ядерній галузі, які в подальшому, протягом багатьох років української незалежності врегульовувались:

а) Ядерним законодавством України:

- Законом України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» № 39 від 08.02.1995р;
- Законом України «Про поводження з радіоактивними відходами» № 255 від 30.06.1995р;
- Законом України «Про видобування та переробку уранових руд» № 645 від 19.11.1997р;
- Законом України «Про захист людини від впливу іонізуючих випромінювань» № 15 від 14.01.1998р;
- Законом України «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії» № 1370 від 11.01.2000р;

- Законом України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» № 2064 від 19.10.2000р;

- Законом України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблоку цієї АЕС на екологічно безпечну систему № 309 від 11.12.1998р.

б) Суміжним законодавством:

- Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища № 1264 від 25.06.1991р;

- Законом України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення № 4004 від 24.02.1994р;

- Законом України «Про екологічну експертизу» № 45 від 09.02.1995р.

в) Міжнародними угодами;

г) Міжурядовими угодами;

д) Міжвідомчими угодами;

е) Указами Президента України;

ж) Розпорядженнями Президента України;

з) Постановами Кабінету Міністрів України.

В ст. 18 Закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» сказано: «До компетенції Кабінету Міністрів України належить: забезпечення розробки і реалізації державних програм у сфері використання ядерної енергії; прийняття рішень про розміщення, проектування, будівництво, експлуатацію та зняття з експлуатації підприємств по випробуванню уранових руд, ядерних установок і об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, крім тих, які визначає Верховна Рада України; розпорядження ядерними установками, ДІВ, ядерними матеріалами, об'єктами, призначеними для поводження з РВ, які перебувають у державній власності; вирішення питань забезпечення захисту людей та навколишнього природного середовища від негативного впливу ІВ; розробка заходів щодо обліку та контролю ядерних матеріалів і ДІВ, ядерних

матеріалів, об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами.

Кабінет Міністрів України не прийняв, такого необхідного, нормативно-правового акту, щодо зняття з експлуатації та подальшої реструктуризації великого уранового виробництва ВО «ПХЗ». В порушення ст. 39 Закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» Кабінет Міністрів України не встановив порядок зняття з експлуатації уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод». Не було розроблено та затверджено відповідного проекту згідно норм, правил, стандартів у сфері використання ядерної енергії.

Держава відсторонилась від вирішення цього важливого питання, не визначила джерела фінансування заходів з утримання цього об'єкта, залишила на відкуп місцевої влади та самого колективу колишнього ВО «ПХЗ». Але зупинений повний цикл виробництва з переробки уранових руд, з метою отримання уранового концентрату, наземні та підземні технологічні лінії і комунікації, сховища та хвостосховища радіоактивних відходів, в яких зберігається більше 42 млн. тон радіоактивних відходів та радіаційно забруднені території південної та північної частин Придніпровського промислового майданчика потребували невідкладних рішень держави!

Слід зазначити, що діюча законодавча та нормативно-правова база з ядерної та екологічної безпеки дозволяє створити безпечні екологічні умови утримання та обслуговування радіаційно забруднених об'єктів та територій колишнього уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод», при умові, що всі ланки цього бюрократичного ланцюга будуть синхронно виконувати свої обов'язки з розв'язання цієї непростой задачі.

В зв'язку з тим, що держава не змогла терміново вирішити питання створення надійної системи фізичного захисту, охорони, екологічної та радіаційної безпеки на Придніпровському промисловому майданчику, вирішення цих завдань взяли на себе органи місцевої влади та

самоврядування, за участю Міністерства палива та енергетики України, з залучення ради директорів підприємств, що утворилися в результаті реструктуризації ВО «Придніпровський хімічний завод», контролюючих та компетентних органів. Постановою 19-ї сесії IV-го скликання Дніпродзержинської міської ради від 24.06.05р. № 562-19/IV вся територія колишнього ВО «ПХЗ», з його сховищам та хвостосховищами з відходами уранового виробництва, була визнана режимною, з посиленням рівнем фізичного захисту охорони та радіаційної безпеки.

Відповідно до розпорядження Дніпродзержинського міського голови від 29.07.2005р. № 131/р. було створено, спільно з Мінпаливенерго України, робочу групу, яка розробила проект «Положення про режимну територію колишнього уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод»». Воно було затверджено рішенням виконкому Дніпродзержинської міської ради від 28.12.2005р. № 1052.

Відповідно до розділу IV «Діяльність на режимній території», статті 4.9 «Внутрішньо-об'єктовий, перепускний режим та охорона режимної території»:

- «Підтримання режиму на режимній території покладено на режимну службу та відомчу воєнізовану охорону (ВВО) ДП «38 ВІТЧ»».

- «Функції охорони зовнішнього периметру режимної території, здійснення контрольно-перепускного режиму персоналу підприємств, підрядних організацій та відвідувачів, контроль ввозу (вивозу) вантажів через контрольно-перепускні пункти режимної території покладаються на ВВО ДП «38 ВІТЧ»».

- «Функції охорони сховищ відходів уранового виробництва та хвостосховищ покладаються на ВВО ДП «38 ВІТЧ»».

Пунктом 4.6 «Розподіл функцій дозиметричних служб» визначено:

- «Функції проведення моніторингу радіологічного та дозиметричного контролю на режимній території, а також дозиметричного контролю під час

проведення земельних, демонтажних, вантажних робіт, а також санітарного оброблення, дезактивації радіоактивно забрудненого транспорту та вантажів покладаються на дозиметричну службу ДП «Бар'єр»».

Система моніторингу режимної території розробляється відповідно до чинних нормативних актів. Головною метою моніторингу є загальна оцінка радіоекологічного стану режимної території».

Функції дозиметричного контролю на контрольно-перепускних пунктах при заїзді (виїзді), виході (вході) за межі режимної території (на територію) транспорту та вантажів, персоналу підприємств, покладається на дозиметричну службу ДП «38 ВІТЧ».

Радіаційний контроль на території, закріплений за суб'єктами господарчої діяльності, що діють на режимній території, забезпечують керівники цих підприємств.

Створена система радіаційної безпеки на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» встановила три ступеня радіаційного контролю, незалежних одне від одного, що унеможливорює корупційну складову та упереджує несанкціоноване переміщення радіаційно-забруднених матеріалів, відходів, продукції виробництва та вантажів, що відповідає вимогам чинного законодавства.

Відповідно до затвердженого Положення, керуючись статтями 33, 42, 59 Закону України «Про місцеве самоврядування в Україні», виконком Дніпродзержинської міської ради, рішенням від 11.05.2007р. № 310 затвердив, розроблені, створеною міськвиконкомом робочою групою, інструкції, що регламентують забезпечення режиму на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод», у т.ч.:

- інструкцію про взаємодію дозиметричної служби ДП «Бар'єр» з дозиметричною службою та ВВО ДП «38 ВІТЧ»;

- інструкцію про утримання та обслуговування земельних фондів на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ»;

- інструкцію про здійснення вихідного дозиметричного контролю на контрольно-перепускних пунктах режимної території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ»;

- інструкцію з радіаційного контролю на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ»;

- інструкцію про порядок підтримання режиму на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ»;

- інструкцію про організацію внутрішньо-об'єктового перепускного режиму на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ».

Затвердженням інструкцій завершилося створення нормативно-правової бази щодо забезпечення виконання функціональних завдань з фізичного захисту, охорони, підтримання установленого режиму, радіаційного контролю, радіаційного моніторингу на режимній території колишнього уранового виробництва, що покладені державою на ДП «38 ВІТЧ» та ДП «Бар'єр».

Слід зазначити, що створена Дніпродзержинською міською радою нормативно - правова база (Положення, Інструкції), за запитом Департаменту фізичного захисту, пожежної безпеки та безпеки життєдіяльності, (лист №14/2-373 від 07.06.07 р.), пройшла юридичну експертизу у Департаменті юридичного забезпечення Мінпаливенерго, і визнана чинною та обов'язковою до виконання, (лист Департаменту юридичного забезпечення №17/571 від 14.06.07 р.).

Для побудови цілісної системи фізичного захисту та охорони радіаційно-ядерних об'єктів, розміщених на режимній території, за ініціативою ДП «Бар'єр», наказом Міністерства палива та енергетики України від 01.02.2008р. № 52 «Про передачу майна з балансу ДП «Бар'єр» на баланс ДП «38 ВІТЧ», до ДП «38 ВІТЧ» було передано периметри хвостосховищ з

радіоактивними відходами колишнього ВО «ПХЗ»: «База-С», «Дніпровське», «Центральний Яр», «Західне», «Південно-західне», «Лантанова фракція», «Доменна піч». Наказом Мінпаливенерго України від 14.07.2008р. № 374 «про передачу державного майна з балансу ДП «ПГМЗ» на баланс ДП «38 ВІТЧ» було передано огороження хвостосховища відходів переробки уранових руд «Суначівське (1, 2 секція)».

Це дозволило ДП «38 ВІТЧ», відповідно до Закону України «Про фізичний захист ядерних установок та ядерних матеріалів», за кошти бюджетної програми КПКВК 1101140 «Фізичний захист ядерних установок та ядерних матеріалів» розробити проекти та розпочати реконструкцію інженерно-технічних засобів фізичного захисту та охорони режимної території, терористично вразливих та радіаційно небезпечних об'єктів колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ».

Слід зазначити, що ще до передачі на баланс ДП «38 ВІТЧ», периметри хвостосховищ були зруйновані та розграбовані, мали майже нульову залишкову вартість. Враховуючи складність завдань, що виникли в процесі діяльності на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ», необхідність прийняття рішень з екологічних та соціальних питань на державному рівні, за ініціативи народного депутата України Шаго Є.П., Мінпаливенерго України, органів місцевого самоврядування, керівництва ДП «38 ВІТЧ» у квітні 2008 року було проведено виїзне засідання Комітету Верховної Ради України з питань екологічної політики, природокористування та ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи, на якому розглянуто комплекс питань, пов'язаних з виконанням Державної програми приведення небезпечних об'єктів виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» в екологічно безпечний стан і забезпечення захисту населення від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання», проблемами екологічної та радіаційної безпеки в районі

розташування колишнього уранового виробництва, за підсумками якого було затверджено Рішення від 03.06.2008 р. № 17/1 «Про виїзне засідання Комітету «Про розгляд екологічних і соціальних питань в районі розташування колишнього ВО «ПХЗ».

Відповідно до цього Рішення Комітету Верховної Ради України, Кабінетом Міністрів України прийнято Розпорядження від 12 листопада 2008 року № 1425-р «Про затвердження плану першочергових заходів на період до 2009 року з поліпшення екологічного стану міста Дніпродзержинська», відповідно до якого ДП «38 ВІТЧ» було виділено додаткові бюджетні кошти за бюджетною програмою «Фізичний захист ядерних установок та ядерних матеріалів» на забезпечення охорони та фізичного захисту небезпечних об'єктів заводу та режимної території.

Вжиті термінові заходи надали можливість взяти під охорону відомчої воєнізованої охорони ДП «38 ВІТЧ» усі радіаційно-ядерні об'єкти, що стоять на балансі ДП «Бар'єр», розпочати реконструкцію огорожі периметрів хвостосховищ «База-С», «Сухачівське (1, 2 секція)», «Дніпровське», продовжити реконструкцію об'єкту «Інженерно-технічний комплекс охорони режимної території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ».

За роки практичної та наукової роботи в ДП «38 ВІТЧ» створено надійну систему фізичного захисту, охорони, радіаційного контролю на всій режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ», яка удосконалюється із року в рік та забезпечує високий рівень безпеки. На базі підприємства було створено Навчальний центр з підвищення кваліфікації робітників, що працюють на РНО ядерно-паливного комплексу України, та професійного навчання, підготовки та перепідготовки фахівців з фізичного захисту та охорони.

Після багатьох років кропіткої праці по створенню надійної системи фізичного захисту, охорони, екологічної та радіаційної безпеки з'явилися «новатори», яким не до

вподоби діюча система безпеки. Вони вирішили її «удосконалити» шляхом лобіювання власного бачення ситуації та внесення в Верховну Раду України так званого нового проекту закону. Запропоновано текст проекту Закону України з привабливою назвою «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок діяльності з переробки уранових руд».

Уважно вивчаючи текст кожної статті, можна прийти до висновку, що автори цього тексту просто не обізнані з нормативно-правовою базою що діє в Україні, законодавством з ядерної та екологічної безпеки.

Починаю з преамбули тексту проекту Закону: «Цей Закон визначає правові та організаційні засади використання території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок діяльності з переробки уранових руд, разом з будь-якою діяльністю, що здійснюється на них, їх охорони, забезпечення захисту та безпеки в існуючих ситуаціях опромінення, а також господарської, науково-технічної та іншої діяльності на цих територіях».

Преамбула по своєму змісту це набір термінів, які не висвітлюють головне завдання – забезпечення захисту життя, здоров'я та майна людей від негативного впливу іонізуючого випромінювання, спричиненого багатолітньою діяльністю колишнього уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод».

Говорячи про радіаційно забруднені території, необхідно терміново вирішити питання щодо державного фінансування їх утримання, обслуговування, здійснення радіаційно-екологічного моніторингу та радіаційного контролю, підтримання у постійній бойовій готовності системи фізичного захисту, охорони, установленого режиму, дотримання режимних вимог на всій території Придніпровського промислового майданчика всіма суб'єктами господарчої діяльності, незалежно від форм власності!

З огляду на фактичний стан цих територій, які визнано, відповідно до

діючого законодавства України, режимними, з посиленням рівнем фізичного захисту охорони та радіаційної безпеки рішенням 19-ї сесії IV скликання Дніпродзержинської міської ради від 24.06.05р. № 562-19/IV, можна сміливо сказати, що вони на даний час покинуті, перетворюються у «дикі джунглі» де водяться дикі звірі та змії і становлять серйозну загрозу життю і здоров'ю працюючого на ній, персоналу підприємств різних форм власності.

Згідно до Закону України № 22/98р «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання», в статті 8, визначені повноваження Верховної Ради України щодо забезпечення захисту людини від впливу іонізуючого випромінювання.

В рамках цих повноважень Верховна Рада України затвердила Постановою № 188/98-ВР [6] відповідні заходи, але практичних кроків щодо їх втілення в життя поки що не має.

Та комусь хочеться створити новий Закон щодо установлення правового режиму територій колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ», яким свідомо може бути зруйновано, створену багаторічною працею, ефективну та діючу нормативно-правову базу з підтримання устанавленого режиму, фізичного захисту, охорони та радіаційної безпеки території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» у м. Кам'янське з його сховищами та хвостосховищами, де зберігається більше 42 млн тон радіоактивних відходів.

В Ст. 9 Закону «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» визначено повноваження Кабінету Міністрів України, міністерств інших центральних органів виконавчої влади щодо забезпечення захисту людини від впливу іонізуючого випромінювання. Уважно ознайомившись з цими повноваженнями, розумієш, що вони повністю відповідають реаліям і вимогам сьогодення, але ця норма виконується частково.

Ст. 10 цього Закону чітко визначено повноваження місцевих органів виконавчої влади щодо забезпечення захисту людини

від впливу іонізуючого випромінювання. Приведемо деякі з цих повноважень:

✓ прийняття згідно із законодавством України рішень щодо застосування на відповідній території заходів захисту осіб з населення від впливу ІВ;

✓ організація проведення в устанавленому порядку щорічних обстежень;

✓ здійснення організаційного керівництва системою обліку та контролю доз опромінення населення на відповідній території;

✓ організація контролю за виконанням заходів щодо захисту людини від впливу радіонуклідів, що містяться у будівельних матеріалах;

✓ погодження планів заходів щодо захисту населення від радіаційних аварій та їх наслідків;

✓ організація та контроль за виконанням заходів щодо захисту населення від радіаційних аварій та їх наслідків.

В тексті проекту нового Закону про роль місцевих органів виконавчої влади в ст. 5, п.2 говорить дуже туманно: «Місцеві органи виконавчої влади здійснюють свої повноваження у сфері управління територією, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок діяльності з переробки уранових руд в межах, визначених чинним законодавством». Проглядається бажання спростити діючу систему підтримання устанавленого режиму, радіаційного контролю, виконання заходів з фізичного захисту радіаційно-ядерних об'єктів. Підтвердженням цьому є ст.1.п.1 тексту проекту майбутнього Закону, яка називається «визначення термінів». Автори цього тексту пропонують ввести новий термін визначення джерел іонізуючого випромінювання - «ДІВ – це залишковий радіоактивний матеріал». Ось суть цього тлумачення: «залишковий радіоактивний матеріал – радіоактивний матеріал, що спричиняє існуючу ситуацію опромінення, для якої втручання є виправданим та яка є наслідком діяльності, подій або обставин у минулому (зокрема

аварій, відсутності або незастосування належних норм права).

Залишковим матеріалом для колишніх уранових виробництв є відходи переробки уранових руд, з активністю від 10 до 12000 Кюри. Відповідно в діючому Законі України «Про поводження з радіоактивними відходами» № 27 від 30.06.1995 року, який останній раз доповнювався нинішнім складом Верховної Ради України 18.11.2021 року, такого терміну також не має. При ознайомленні з іншими діючими нормативно-правовими актами, також є певні невідповідності і неточності тлумачення та подання видати бажане за дійсне. Виходячи з вище зазначеного, введення нових термінів, положень та тверджень в нормативно-правові акти треба вносити тільки спираючись на світові сучасні тенденції та дослідження, які теоретично обґрунтовані та лабораторно (експериментально) підтвердженні [10-11].

Особливо треба звернути увагу на сучасні тенденції, що викладені в публікації International Commission on Radiation Protection [10]: ICRP Publication 130 p.1 ICRP Publication 134 p.2, ICRP Publication 137 p.3, ICRP Publication 141 p.4, ICRP Publication 151 p. 5 (назва Публікації МКРЗ: «Професійне надходження радіонуклідів») та ICRP Publication 152 (назва Публікації МКРЗ: «Методика розрахунку радіаційної шкоди»).

Необхідно зосередити увагу державних органів влади, місцевих органів виконавчої влади та самоврядування на повне виконання норм ядерного законодавства України в частині підтримання належного рівня фізичного захисту, охорони та радіаційної безпеки на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ». Першочергово вирішити питання фінансового забезпечення діяльності державного підприємства «Бар'єр», на яке покладено обов'язки з утримання та обслуговування радіаційно-ядерних об'єктів уранового виробництва, сховищ та хвостосховищ, радіоактивних відходів. Звернутися з обґрунтованою вимогою до Кабінету Міністрів України, до

Комітету Верховної Ради України з питань екологічної політики, природокористування та ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи та Комітету Верховної Ради України з питань бюджету щодо виділення коштів із Державного фонду поводження з радіоактивними відходами, який створено у складі спеціального фонду Державного бюджету на 2024-2025 роки на фінансування діяльності ДП «Бар'єр». Необхідно розробити та затвердити Державну цільову екологічну Програму поводження з радіоактивними відходами та приведення радіаційно забруднених режимних територій колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» у м. Кам'янське, Дніпропетровської області в екологічно безпечний стан.

Висновки

З огляду на викладене, враховуючи невідповідність запропонованого тексту проекту Закону України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок діяльності з переробки уранових руд» вимогам діючих законів та нормативно-правових актів існуючих викликів сьогодення, в умовах воєнного стану, пропонуємо:

1. Враховуючи військовий стан у державі, перегляд нормативно-правових актів вважати доцільним тільки в рамках Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. До цього часу, в своїй подальшій діяльності ДП «38 ВІТЧ» та ДП «Бар'єр» по забезпеченню фізичного захисту, охорони, радіаційної безпеки, обслуговуванню уранових об'єктів, підтриманню установленого режиму на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» повинні керуватися діючою нормативно-правовою базою.

2. Створити міжвідомчу комісію з представників державних, контролюючих органів, компетентних в питаннях екологічної та радіаційної безпеки, дотримання чинного законодавства України з питань поводження з радіоактивними відходами, захисту людини від іонізуючого випромінювання для вивчення реального стану екологічної та радіаційної безпеки на

Придніпровському промисловому майданчику, з метою корегування та координації спільних заходів державних, місцевих органів виконавчої влади, відповідних контролюючих органів для подальшого удосконалення створеної системи фізичного захисту, екологічної та радіаційної безпеки.

3. Відновити діяльність Координаційної ради, створеної виконкомом Кам'янської міської ради з питань координації дій суб'єктів господарської діяльності, що функціонують на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ».

4. Посилити рівень фізичного захисту та підтримання установленого міською радою режиму на режимній території, здійснити комплекс проти диверсійних заходів безпеки в умовах військового стану та повномасштабної війни РФ проти України.

5. Взяти під належний державний контроль міжнародне співробітництво у сфері радіаційної безпеки, приведення радіаційно-забруднених територій від діяльності, виведених з експлуатації, уранових виробництв в екологічно безпечний стан.

6. Забезпечити постійний науковий супровід порядку поводження з радіоактивними відходами на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ», з долученням науково-технічних працівників і організацій Дніпропетровщини.

7. Затвердити нові підходи щодо проведення моніторингу радіаційно-забруднених територій за рахунок дистанційно-керованих апаратів для мінімізації опромінення персоналу та охорони, що працює на периметрах промислових майданчиків (хвостосховищ) в умовах загроз воєнного стану в Україні.

8. Ініціювати прийняття рішення Кабінету Міністрів України щодо продовження фінансування державного підприємства «Бар'єр», згідно державної програми, та звільненням від сплати земельного податку радіаційно забруднені території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» з розташованими на них сховищами та хвостосховищами радіоактивних відходів та інженерно-технічним комплексом з фізичного захисту та охорони.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»». Київ, 2017.
2. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року». Київ, 2023.
3. Державна програма «Приведення небезпечних об'єктів виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» в екологічно безпечний стан і забезпечення захисту населення від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання на 2005–2014 роки» (Постанова КМУ від 26.11.2003 р. № 1846).
4. Державна цільова екологічна програма приведення в безпечний стан уранових об'єктів виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» (Постанова Кабінету Міністрів України від 30 вересня 2009 року № 1029).
5. Державна цільова екологічна програма першочергових заходів приведення у безпечний стан об'єктів і майданчика колишнього уранового виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» на 2019–2023 роки (Постанова Кабінету Міністрів України від 21 серпня 2019 року № 756).
6. Постанова № 188/98-ВР від 05.03.1998 «Про основні напрями державної політики України у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки». Київ, 1998.
7. Наказ № 115 від 17.02.2001 Про затвердження «Комплексної програми здійснення державного санітарного нагляду в галузі радіаційної безпеки України, радіаційного моніторингу довкілля установами та закладами Державної санітарно-епідеміологічної служби МОЗ України із залученням науково-дослідних інститутів АМН України на 2006-2010 роки». Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2001.
8. Наказ № 137 від 20.03.2011 Про затвердження «Комплексної програми здійснення державного санітарно-епідеміологічного нагляду в галузі радіаційної безпеки України, радіаційного моніторингу довкілля установами та закладами Державної санітарно-епідеміологічної служби МОЗ України із залученням науково-дослідних інститутів АМН України на 2011-2020 роки». Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2011.
9. Національний класифікатор України. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010. Наказ Держспоживстандарту України № 457 від 11.10.2010. Київ, 2010.

10. Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ). URL: <https://www.icrp.org>.
11. Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ). URL: <https://www.iaea.org>.

REFERENCES

1. *Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 18 serpnia 2017 r. № 605-r "Pro skhvalennya Enerhetychnoyi stratehiyi Ukrayiny na period do 2035 roku "Bezpeka, enerhoefektyvnist', konkurentospromozhnist'"* [Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 18, 2017. No. 605-r "On the approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 "Safety, energy efficiency, competitiveness"]. Kyiv, 2017. (in Ukrainian).
2. *Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 21 kvitnia 2023 r. № 373-r "Pro skhvalennya Enerhetychnoyi stratehiyi Ukrayiny na period do 2050 roku"* [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 21, 2023. No. 373-r "On the approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2050"]. Kyiv, 2023. (in Ukrainian).
3. *Derzhavna prohrama "Pryvedennya nebezpechnykh ob'ektiv vyrobnychoho ob'yednannya "Prydniprovsk'kyi khimichnyy zavod" v ekolohichno bezpechnyy stan i zabezpechennya zakhystu naselennya vid shkidlyvoho vplyvu ionizuyuchoho vypromynyuvannya na 2005–2014 roky"* (Postanova KМУ vid 26.11.2003 r. № 1846) [State program "Bringing dangerous objects of the production association "Prydniprovsk Chemical Plant" into an ecologically safe state and ensuring the protection of the population from the harmful effects of ionizing radiation for the years 2005–2014" (CMU Resolution of November 26, 2003, no. 1846)]. (in Ukrainian).
4. *Derzhavna tsil'ova ekolohichna prohrama pryvedennya v bezpechnyy stan uranovykh ob'ektiv vyrobnychoho ob'yednannya "Prydniprovsk'kyi khimichnyy zavod"* (Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 30 veresnia 2009 roku № 1029) [State target ecological program of bringing uranium objects of the production association "Prydniprovsky Chemical Plant" into a safe state (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated September 30, 2009, no. 1029)]. (in Ukrainian).
5. *Derzhavna tsil'ova ekolohichna prohrama pershocherhovykh zakhodiv pryvedennya u bezpechnyy stan ob'ektiv i maydanchyka kolyshn'oho uranovoho vyrobnychoho ob'yednannya "Prydniprovsk'kyi khimichnyy zavod" na 2019–2023 roky* (Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 21 serpnia 2019 roku № 756) [State target environmental program of priority measures to bring the facilities and site of the former uranium production association "Prydniprovsky Chemical Plant" into a safe state for 2019–2023 (Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 21, 2019, no. 756)]. (in Ukrainian).
6. *Postanova № 188/98-VR vid 05.03.1998 "Pro osnovni napryamy derzhavnoyi polityky Ukrayiny u haluzi okhorony dokillia, vykorystannya pryrodnykh resursiv ta zabezpechennya ekolohichnoyi bezpeky"* [Resolution no. 188/98-BP dated 05.03.1998 "On the main directions of the state policy of Ukraine in the field of environmental protection, use of natural resources and ensuring environmental safety"]. Kyiv, 1998. (in Ukrainian).
7. *Nakaz № 115 vid 17.02.2001 Pro zatverdzhennya "Kompleksnoyi prohrama zdiysnennya derzhavnoho sanitarnoho nahlyadu v haluzi radiatsiynoyi bezpeky Ukrayiny, radiatsiynoho monitorynhu dokillia ustanovamy ta zakladamy Derzhavnoyi sanitarno-epidemiolohichnoyi sluzhby MOZ Ukrayiny iz zaluchennyam naukovykh doslidnykh institutiv AMN Ukrayiny na 2006–2010 roky"* [Order no. 115 dated 02.17.2001 on the approval of the "Comprehensive program of implementation of state sanitary supervision in the field of radiation safety of Ukraine, radiation monitoring of the environment by institutions and establishments of the State Sanitary and Epidemiological Service of the Ministry of Health of Ukraine with the involvement of scientific research institutes of the Ministry of Health of Ukraine for the years 2006–2010"]. Kyiv : Ministry of Health of Ukraine, 2001. (in Ukrainian).
8. *Nakaz № 137 vid 20.03.2011 Pro zatverdzhennya "Kompleksnoyi prohrama zdiysnennya derzhavnoho sanitarno-epidemiolohichnoho nahlyadu v haluzi radiatsiynoyi bezpeky Ukrayiny, radiatsiynoho monitorynhu dokillia ustanovamy ta zakladamy Derzhavnoyi sanitarno-epidemiolohichnoyi sluzhby MOZ Ukrayiny iz zaluchennyam naukovykh doslidnykh institutiv AMN Ukrayiny na 2011–2020 roky"* [Order no. 137 dated 20.03.2011 On the approval of the "Comprehensive program of state sanitary-epidemiological supervision in the field of radiation safety of Ukraine, radiation monitoring of the environment by institutions and establishments of the State Sanitary-Epidemiological Service of the Ministry of Health of Ukraine with the involvement of research institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine for 2011–2020"]. Kyiv : Ministry of Health of Ukraine, 2011. (in Ukrainian).
9. *Natsional'nyy klasyfikator Ukrayiny. Klasyfikator nadzvychaynykh sytuatsiy DK 019:2010. Nakaz Derzhspozhyvstandartu Ukrayiny № 457 vid 11.10.2010* [National Classifier of Ukraine. Classifier of emergency situations DK 019:2010. Order of the State Consumer Standard of Ukraine no. 457 dated 11.10.2010]. Kyiv, 2010. (in Ukrainian).
10. *Mizhnarodna komisiya z radiatsiynoho zakhystu (MKRZ)* [International Commission on Radiation Protection (ICRP)]. URL: <https://www.icrp.org>. (in Ukrainian).
11. *Mizhnarodne ahentstvo z atomnoyi enerhiyi (MAHATE)* [International Atomic Energy Agency (IAEA)]. URL: <https://www.iaea.org>. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 11.10.2024.

УДК 62.04:62.91:62.92:331.4:534.6:614.8:620.179:629.4.082
DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.42.1109

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА АДАПТАЦІЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З УРАХУВАННЯМ ПРИНЦИПУ АДЕКВАТНОСТІ ЙМОВІРНОСТЕЙ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
МАЦУК З. М.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
КОРОТАЄВ В. М.³, *канд. юридичних наук*,
ТРИГУБЕНКО В. О.⁴

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. + 38 (0562) 47-03-25, e-mail: belicov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 731-52-26, e-mail: matsuk.zachar@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6114-9536

³ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, туп. Будівельний 1, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 732-16-96, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0269-0389

⁴ Південно-Східне міжрегіональне управління Державної служби з питань праці, вул. Коксохімічна, 1, 49064, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 778-01-81, e-mail: dp@dsp.gov.ua

Анотація. Постановка проблеми. У зв'язку з військовою агресією Україна потрапила у фронт екзистенціальних загроз. Кожного дня гинуть люди. Щодня об'єкти критичної інфраструктури (надалі – КІ), цивільні і військові об'єкти зазнають значних пошкоджень. В нетривіальних небезпечних діях супротивника проглядається неприхована спроба примушення нашої країни до територіальних і політичних поступок шляхом здійснення деструктивного впливу на стійкість елементів системи національної безпеки, тому забезпечення безпеки і оборони України є головним завданням сьогодення, а забезпечення економічної стабільності (стійкості) країни в умовах війни є такою ж першочерговою задачею як і збереження життя і здоров'я громадян. Відомо, що безпека і економічна стабільність (стійкість) країни без сталої роботи об'єктів КІ неможливі. У відповідності до вимог пп. 23, ст. 1 Закону України «Про критичну інфраструктуру» [1882-IX] «стійкість критичної інфраструктури» – це такий стан критичної інфраструктури, за якого забезпечується її спроможність функціонувати у штатному режимі, адаптуватися до умов, що постійно змінюються, протистояти та швидко відновлюватися після впливу загроз будь-якого виду. Відповідно до вимог пп. 1, ст. 15 Закону України «Про критичну інфраструктуру» [1882-IX] забезпечення захисту та стійкості КІ здійснюється у наступних режимах її функціонування: штатному режимі; режимі готовності та запобігання реалізації загроз; режимі реагування на виникнення кризової ситуації; режимі відновлення штатного функціонування, а функціонування КІ у штатному режимі здійснюється відповідно до проектного цільового призначення. Відсутність в зазначеному переліку режиму адаптації, а в проектах об'єктів КІ заходів забезпечення їх стійкості у згаданих режимах функціонування, ускладнює процес забезпечення безпеки, що є проблемою. **Мета статті** – обґрунтування необхідності синтезу та введення поняття «адаптація критичної інфраструктури» до положень Закону України «Про критичну інфраструктуру» [1882-IX] та інших взаємопов'язаних нормативно-правових актів. **Висновок.** Обґрунтовано необхідність синтезу та введення поняття «адаптація критичної інфраструктури» до положень Закону України «Про критичну інфраструктуру» [1882-IX] та інших взаємопов'язаних нормативно-правових актів. Вперше запропоновано нове формулювання поняття «адаптація критичної інфраструктури».

Ключові слова: *стійкість; критична інфраструктура; розмаїття; заходи; принцип; адекватність; управління*

ENSURING THE SECURITY AND ADAPTATION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE CONSIDERING THE PRINCIPLE OF PROBABILITY ADEQUACY

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
MATSUK Z.M.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOROTAIV V.M.³, *Ph.D. of Juridical Sc.*,

TRYHUBENKO V.O.⁴

¹ Department of Occupational Safety, Civil, and Technogenic Security, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-03-25, e-mail: belicov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Occupational Safety, Civil, and Technogenic Security, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 731-52-26, e-mail: matsuk.zachar@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6114-9536

³ Dnipro Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, 1, tupyk Budivel'nyj, Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 732-16-96, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389

⁴ South-Eastern Interregional Administration of the State Labor Service, 1, Koksochemychnya St., Dnipro, 49064, Ukraine, tel. +38 (056) 778-01-81, e-mail: dp@dsp.gov.ua

Abstract. Problem statement. Due to military aggression, Ukraine faces existential threats. Lives are lost every day, and critical infrastructure (hereinafter CI), along with civilian and military facilities, suffer significant damage. The adversary's unconventional hostile actions clearly reflect an attempt to force our country into territorial and political concessions by destructively impacting the resilience of national security system elements. Therefore, ensuring Ukraine's security and defense is the foremost priority today, and maintaining the country's economic stability (resilience) amid war is as essential as protecting the lives and health of citizens. It is known that the security and economic stability (resilience) of a country are impossible without the stable operation of CI. According to clause 23, Article 1 of the Law of Ukraine "On Critical Infrastructure" [1882-IX], "critical infrastructure resilience" refers to a state in which CI maintains its ability to function in normal mode, adapt to constantly changing conditions, withstand and quickly recover from any type of threat. In accordance with clause 1, Article 15 of the Law of Ukraine "On Critical Infrastructure" [1882-IX], the protection and resilience of CI are provided in the following modes of operation: normal mode; readiness and threat prevention mode; crisis response mode; and recovery mode to restore normal functioning, with CI operating in normal mode according to its design purpose. The absence of an adaptation mode in this list, along with the lack of resilience measures for CI in these modes, complicates the security process, which presents a problem. **The purpose of the article** – is to substantiate the necessity of synthesizing and introducing the concept of "critical infrastructure adaptation" into the provisions of the Law [1] and other interrelated regulatory acts. **Conclusions.** The necessity of synthesizing and introducing the concept of 'critical infrastructure adaptation' into the provisions of the Law [1] and other interrelated regulatory acts has been substantiated. A new formulation of the concept of "critical infrastructure adaptation" is proposed for the first time.

Keywords: *resilience; critical infrastructure; diversity; measures; principle; adequacy; management*

Постановка проблеми. У відповідності до вимог пп. 23, ст. 1 Закону України «Про критичну інфраструктуру» [1] (далі за текстом – Закон) стійкість критичної інфраструктури – це такий стан критичної інфраструктури, за якого забезпечується її спроможність функціонувати у штатному режимі, адаптуватися до умов, що постійно змінюються, протистояти та швидко відновлюватися після впливу загроз будь-якого виду.

У тлумаченні ДСТУ 8773:2018 [2], стале функціонування об'єкту – це здатність об'єкта в умовах надзвичайного стану та в особливий період випускати якісну продукцію та надавати послуги в запланованому обсязі відповідно до визначеної номенклатури, а у разі дії уражального чинника джерела надзвичайної ситуації у мінімально короткі строки відновлювати свою роботу.

Ці поняття і перетинаються і відрізняються одночасно. Якщо з тлумаченням ДСТУ [2] все більш-менш зрозуміло, то тлумачення Закону [1] має нерозкрите поняття «адаптація», яке як відомо, частіше застосовується до об'єктів живої природи, ніж до об'єктів техносфери.

Відповідно до вимог пп. 1, ст. 15 Закону [1] забезпечення захисту та стійкості КІ здійснюється в наступних режимах її функціонування: штатному режимі; режимі готовності та запобігання реалізації загроз; режимі реагування на виникнення кризової ситуації; режимі відновлення штатного функціонування. Функціонування КІ у штатному режимі здійснюється відповідно до проектного цільового призначення.

Одже, відсутність у положеннях Закону [1] поняття «адаптація критичної інфраструктури», відсутність у згаданому вище переліку режимів функціонування КІ «режиму адаптації», а в проєктах об'єктів КІ

заходів забезпечення їх стійкості в усіх згаданих режимах функціонування, ускладнює процес забезпечення безпеки КІ, що є проблемою.

Мета статті – обґрунтування необхідності синтезу та введення поняття «адаптація критичної інфраструктури» до положень Закону [1] та інших взаємопов'язаних нормативно-правових актів.

Результати досліджень. Відомо, що адаптація (від лат. adaptation – пристосування) – це пристосування в процесі еволюції будови, функцій, поведінки організмів (особин, популяцій, видів) до умов існування [3].

В еволюційному сенсі це означає розвиток нових ознак, які покращують виживання та/або репродуктивний успіх організму [4].

Відомо, що психологічна адаптація – це здатність індивідів пристосовуватися до нових умов, стресових ситуацій [5].

Адаптація в бізнесі – це здатність організацій швидко реагувати на зміни ринкових умов [6].

Соціальна адаптація – процес, через який індивіди або групи пристосовуються до нових соціальних норм і культурних особливостей [7].

Загальні принципи адаптації:

а) пластичність – здатність системи змінюватися у відповідь на нові умови;

б) гнучкість – можливість змінювати підходи, процеси чи стратегії;

в) динамічність – адаптація є постійним і циклічним процесом;

Одже, адаптація є важливим елементом виживання як на біологічному, так і на соціальному рівнях, дозволяючи системам відповідати на виклики та зміни.

Адаптація в техніці – це процес налаштування технічних систем відповідно до змін умов експлуатації або до нових нормативних вимог з метою забезпечення ефективної роботи і безпеки [8].

Базові аспекти адаптації в техніці:

1. Адаптивність систем. Тоді коли системи можуть самостійно змінювати свої

параметри або функції у відповідь на зміни зовнішніх або внутрішніх умов;

2. Адаптивне керування. Підхід, при якому системи управління здатні змінювати алгоритми роботи з метою збереження балансу, стабільності та вибору оптимальних режимів роботи в умовах що змінюються.

Адаптація в машинобудуванні реалізується через внесення змін до будови або технологічного процесу, з метою підготовки машин (обладнання) до появи нових матеріалів або умов експлуатації [8].

Адаптація у сфері національної безпеки – це процес пристосування державних структур до змін умов існування держави.

Основні аспекти адаптації у сфері національної безпеки:

1. Зміна стратегій в умовах зміни загроз, із розробкою нових політик, планів, заходів реагування на нові виклики.

2. Розробка та впровадження заходів із заздалегідь оціненою ймовірністю їх позитивно-компенсаційного впливу [9].

3. Впровадження сучасних технологій у сфері моніторингу загроз, інфраструктурних змін, технічне переоснащення.

4. Підготовка адекватних кадрів, здатних ефективно реагувати на нові виклики через оновлення навчальних програм, в першу чергу, для працівників підприємств критичної інфраструктури.

5. Співробітництво шляхом створення міждержавних коаліцій, альянсів тощо для боротьби з тероризмом і агресією, обміну інформацією, досвідом, спільної підготовки.

6. Стійкість, через розвиток здатності протистояти екзистенційним загрозам, будь-то війна, природні катастрофи, епідемії чи економічні потрясіння [10; 11].

Важливим фактором адаптації і стійкості є розмаїття. Розмаїття як спосіб адаптації життя на Землі – це концепція, яка підкреслює важливість біологічного та екологічного розмаїття для виживання і стійкості різних видів [12]. Розмаїття охоплює розмаїття видів, генетичне та екосистемне розмаїття.

Основні аспекти розмаїття як способу адаптації:

1. Біологічне розмаїття:

– розмаїття видів. Наявність багатьох видів рослин і мікроорганізмів дозволяє екосистемам адаптуватися до нових умов довкілля;

– генетичне розмаїття. Всередині видів генетичне розмаїття дозволяє популяціям адаптуватися до змін довкілля. Чим більше генетичне розмаїття, тим вища ймовірність того, що деякі особини отримають риси, які дозволять їм вижити в умовах хвороб або змін клімату [12].

2. Екосистемне розмаїття:

– розмаїття екосистем, таких як ліси, луки, водойми і пустелі, створює більш стійке середовище, сприяє регулюванню клімату, очищенню води, підтриманню родючості ґрунту і запобіганню ерозії, що робить їх життєво важливими для збереження життя [13].

Розмаїття забезпечує екосистемам гнучкість і здатність адаптуватися до змін клімату, природних катастроф тощо.

Стійкість екосистем до змін також залежить від взаємодії між різними видами.

Приклади розмаїття в адаптації:

– взаємозв'язки між хижаками і жертвами, а також між обпилювачами і рослинами сприяють підтриманню балансу і стійкості, ініціюють адаптацію;

– в умовах підвищення температури одні види рослин вимирають, а інші, адаптовані до нових умов, живуть і поширюються;

– екосистеми тропічних лісів мають найвищий рівень біорозмаїття, що робить їх простором для життя;

– через початковий обертальний рух хмар навколо центрів мас майбутні планети Всесвіту отримали первинний орбітальний момент імпульсу, який змушує їх рухатися по орбітах й досі. Саме з тих пір гравітаційне тяжіння Сонця притягує нашу планету. Завдяки унікальній масі і швидкості руху Земля не падає на Сонце, тобто орбітальний рух Землі як і життя на Землі, серед іншого, зумовлені унікальним балансом між масою, швидкістю Землі і гравітаційною силою Сонця [14].

Тобто, розмаїття і баланс це ключові фактори існування нашої планети і життя на ній, а забезпечення їх є шляхом до підвищення рівня стійкості планети (життя) перед обличчям глобальних викликів.

Отже, загальний алгоритм існує й ефективність його доведено. Такий алгоритм забезпечення безпеки життя на Землі базується на адекватності заходів безпеки небезпекам (загрозам) за впливом і характером й розмаїтті видів в живій природі, що теж можливо розглядати як захід безпеки життя на Землі.

В сучасних умовах, з метою розробки ефективних заходів забезпечення безпеки та стійкості КІ вважаємо за необхідне звернутися до досвіду адаптації життя на планеті Земля.

Враховуючи досвід людства констатуємо, що тільки за умов, що заходи безпеки адекватні загрозам за впливом і достатньо різноманітні за характером, а процеси секціоновані в просторі, система здатна знаходитись у стані відносної рівноваги (безпеки), адаптуватися до загроз і розвиватися, прагнучи досягнути максимальної реалізації своїх можливостей.

З огляду на вищевикладене, пропонуємо використовувати наступне визначення для поняття «адаптація критичної інфраструктури».

Адаптація критичної інфраструктури – це динамічний процес пристосування виробничого персоналу, будови, технологічних та виробничих процесів, систем управління об'єктів КІ тощо до умов, що постійно змінюються, в усіх режимах функціонування КІ, з метою забезпечення стійкості КІ, з урахуванням безпеки КІ.

Зрозуміло, що адаптація КІ є заходом безпеки. Згідно «принципу адекватності ймовірностей» [9] – заходи безпеки повинні бути адекватними і пропорційними загрозам, відповідати їх характеру і масштабу, з урахуванням фактичної і прогнозованої ймовірності їх позитивно-компенсаційного впливу та можливих наслідків. Таким чином, комбінованим показником прогнозу адаптивності (безпеки) КІ може стати функція добутку

співвідношень (балансу) між значеннями ймовірності настання подій, викликаних дією зовнішніх і внутрішніх факторів та/або умов (надалі – загроз) і значеннями ймовірності позитивно-компенсаційного впливу відповідних заходів протидії зазначеним загрозам, у межах сучасних фахових понять, знань, уявлень і факторів та/або інших умов, що характеризують фактичний стан захищеності системи від дії зазначених загроз [15].

Висновки

Обґрунтована необхідність синтезу та введення поняття «адаптація критичної інфраструктури» до положень Закону [1] та інших взаємопов'язаних нормативно-правових актів. Вперше «синтезоване» та запропоноване поняття «адаптація критичної інфраструктури» та його визначення. Обговорення цих питань винесено на засідання міжнародної науково-технічної конференції «Безпека праці в ХХІ столітті», ННІ ПДАБА, УДУНТ, 11.2024.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16 лист. 2021 р. № 1882-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 5. С. 13. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
2. ДСТУ 8773:2018. Склад та зміст розділу інженерно-технічних заходів цивільного захисту в складі проектної документації на будівництво об'єктів. Основні положення. [Чинний від 2018-05-15]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 18 с.
3. Лановенко О. Г., Остапішина О. О. Словник – довідник з екології : навч.-метод. посіб. Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2013. 226 с
4. Дарвін Ч. Походження видів через природний добір або збереження сприятливих порід у боротьбі за життя. Харків : Державне медичне видавництво, 1936. 675 с.
5. Richard S. Lazarus, Susan Folkman. Stress, Appraisal, and Coping : Springer Publisher Company, 1984. 456 p.
6. Kotter J. Leading Change. Harvard business review pres, 1996. 194 p.
7. Berry J. W. Immigration, acculturation, and adaptation. *Applied Psychology : an International Review*. 1997. № 46 (1). Pp. 5–34.
8. Ogata K. Modern Control Engineering. Pearson, 2010. 894 p.
9. Matsuk Z. N., Belikov A. S., Protsiv V. V., Severin V. S., Kcharchenko V. V. Adequacy of measures to threats as one of the fundamental principles of safety riskology. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. № 5. Pp. 99–106.
10. Лисецький Ю. М., Павленко Д. Г., Семенюк Ю. В. Національна безпека України : Організаційно правові аспекти. *Вчені записки ТНУ імені Б.І. Вернадського. Серія : Державне управління*. 2021. № 4. С. 109–116.
11. Ситник Г. П., Орел М. Г. Національна безпека в контексті європейської інтеграції України. Київ : Міжрегіональна Академія управління персоналом, 2021. 372 с.
12. Wilson E. O. The Diversity of Life : Penguin Books. 2001. 432 p.
13. Madin J. S. et al. The Role of Biodiversity in Functioning of Ecosystem. *Biology Bulletin*. 2024. № 51 (2). Pp. 432–442.
14. Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie An Introduction to Modern Astrophysics. Cambridge uni. press, 2017. 1359 p.
15. Беліков А. С., Мацук З. М., Шаломов В. А., Харченко В. В. Підвищення безпеки рухомого складу за рахунок ризик-орієнтованого підходу до «керування тертям» в парі тертя «коесо – рейка». *Залізничний транспорт України*. 2023. № 3 (148). С. 23–37.

REFERENCES

1. *Pro krytychnu infrastrukturu* [About critical infrastructure]. 2023, no. 5, 13 p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text> (in Ukrainian).
2. *DSTU 8773:2018. Sklad ta zmist rozdlu inzhenerno-tekhnichnykh zakhodiv tsyvilnoho zakhystu v skladi proektnoi dokumentatsii na budivnytstvo ob'ektiv. Osnovni polozhennia* [DSTU 8773:2018. Composition and content of the section of engineering and technical measures of civil protection in the design documentation for the construction of objects. Basic provisions. Valid from 2018-05-15]. Kyiv : DP “UkrNDNC” Publ., 2018, 18 p. (in Ukrainian).
3. Lanovenko O.H. and Ostapishyna O.O. *Slovyk – dovidnyk z ekolohii : navchalno-metodychnyi posibnyk* [Dictionary – handbook on ecology : educational and methodological guide]. Kherson : PP Vyshemyrskyi V.S., 2013, 226 p. (in Ukrainian).

4. Darwin Ch. *Pokhodzhennia vydiv cherez pryrodnyi dobir abo zberezhennia spriyatlyvykh porid u borotbi za zhyttia* [The origin of species through natural selection or the preservation of favorable breeds in the struggle for life]. Kharkiv : Derzhavne medychno vydavnytstvo, 1936, 675 p. (in Ukrainian).
5. Richard S. Lazarus and Susan Folkman. *Stress, Appraisal, and Coping* : Springer Publisher Company, 1984, 456 p.
6. Kotter J. *Leading Change*. Harvard business review press, 1996, 194 p.
7. Berry J.W. Immigration, acculturation, and adaptation. *Applied Psychology : an International Review*. 1997, no. 46 (1), pp. 5–34.
8. Ogata K. *Modern Control Engineering*. Pearson, 2010, 894 p.
9. Matsuk Z.N., Belikov A.S., Protsiv V.V., Severin V.S. and Kcharchenko V.V. Adequacy of measures to threats as one of the fundamental principles of safety riskology. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024, no. 5, pp. 99–106. (in Ukrainian).
10. Lysetskyi Yu.M., Pavlenko D.H. and Semeniuk Yu.V. *Natsional'na bezpeka Ukrayiny : Orhanizatsiyno pravovi aspekty* [National security of Ukraine : Organizational and legal aspects]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya : Derzhavne upravlinnya* [Academic notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series : Public Administration]. 2021, no. 4, pp. 109–116. (in Ukrainian).
11. Sytnyk H.P. and Orel M.H. *Natsionalna bezpeka v konteksti yevropeiskoi intehtratsii Ukrainy* [National security in the context of European integration of Ukraine]. Kyiv : Mizhrehionalna Akademiia upravlinnia personalom, 2021, 372 p. (in Ukrainian).
12. Wilson E.O. *The Diversity of Life* : Penguin Books. 2001, 432 p.
13. Madin J. S. et al. The Role of Biodiversity in Functioning of Ecosystem. *Biology Bulletin*. 2024, no. 51 (2), pp. 432–442.
14. Bradley W. Carroll and Dale A. Ostlie *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge uni. press, 2017, 1359 p.
15. Bielikov A., Matsuk Z., Shalomov V. and Kharchenko V. *Pidvyshchennya bezpeky rukhomoho skladu za rakhunok ryzyk-oriyentovanoho pidkhodu do "keruvannya tertiyam" v pari tertya "koleso – reyka"* [Improving safety of rolling stock through a risk-based approach to “managing friction” in “wheel – rail” friction pair]. *Zaliznychnyy transport Ukrayiny* [Railway Transport of Ukraine]. 2023, no. 3 (148), pp. 99–106. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.10.2024.

УДК 519.6:331.45:504.054

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.48.1110

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ДОМІШКИ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ ПРИ СКЛАДНІЙ СХЕМІ ВЕНТИЛЯЦІЇ

БІЛЯЄВ М. М.¹, докт. техн. наук, проф.,
БІЛЯЄВА В. В.², докт. техн. наук, проф.,
БЕРЛОВ О. В.^{3*}, канд. техн. наук, доц.,
КОЗАЧИНА В. А.⁴, канд. техн. наук, доц.,
КОЛЕСНИКОВ С. О.⁵, канд. фіз.-мат. наук, доц.

¹ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Кафедра енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Кафедра охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 247-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Кафедра природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНБЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, 69008, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: sergiy.kolesnykov@mipolytech.education, ORCID ID: 0000-0002-9538-8858

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається розробка та практичне використання чисельної моделі для аналізу процесу забруднення повітря в робочому приміщенні при аварійному витоку токсичної речовини. **Мета роботи.** Створення чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу нестационарного процесу розповсюдження токсичної речовини в робочому приміщенні. **Методика.** Моделювання розповсюдження токсичної речовини при роботі аварійної вентиляції здійснюється на базі рівняння Лапласа для потенціалу швидкості та рівняння масопереносу, що враховує конвективний та дифузійний перенос токсичної речовини. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь механіки суцільного середовища здійснюється за допомогою кінцево-різницевої схем з використанням метода маркування. **Наукова новизна.** Створена чисельна модель для прогнозування рівня забруднення повітря в робочому приміщенні внаслідок емісії токсичного газу. Модель базується на чисельному інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Особливістю чисельної моделі є врахування основних фізичних факторів, що впливають на розповсюдження токсичного газу в приміщенні (наявність обладнання в приміщенні, положення отворів вентиляції, міста емісії токсичної речовини тощо) та швидкість розрахунку. **Практична значущість.** Розроблена чисельна модель може бути використана для наукового обґрунтування параметрів аварійної вентиляції для робочих приміщень, де можлива емісія токсичних речовин. **Висновки.** Для аналізу та прогнозу процесу хімічного забруднення робочого приміщення розроблена динамічна багатфакторна чисельна модель. Особливістю чисельної моделі є можливість враховувати основні фізичні фактори, що впливають на формування областей забруднення в робочих приміщеннях. Розроблена чисельна модель може бути використана для наукового обґрунтування параметрів аварійної вентиляції для швидкого зниження концентрації токсичної (або вибухонебезпечної) речовини в робочому приміщенні.

Ключові слова: аварійне забруднення повітря; робоче приміщення; чисельне моделювання; хімічно небезпечна речовина

SIMULATION OF IMPURITY SPREAD IN THE WORKING ROOM WITH A COMPLEX VENTILATION SCHEME

BILIAIEV M.M.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BILIAIEVA V.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BERLOV O.V.^{3*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
KOZACHYNA V.A.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
KOLESNYKOV S.O.⁵, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.

¹ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Department of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCIDID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Department of Natural Sciences and General Engineering Disciplines, LLC "Technical University "METINVEST POLYTECHNIC"", 80, Southern Highway, Zaporizhzhia, 69008, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: sergiy.kolesnykov@mipolytech.education, ORCID ID: 0000-0002-9538-8858

Abstract. Problem statement. The development and practical use of a numerical model for the analysis of the process of air pollution in the workplace during an emergency leak of a toxic substance is considered. **The purpose of the article.** Creation of numerical models of aerodynamics and mass transfer of the non-stationary process of the spread of a toxic substance in the workplace. **Methodology.** Modeling of the spread of a toxic substance during the operation of emergency ventilation is carried out on the basis of the Laplace equation for the velocity potential and the mass transfer equation, which takes into account the convective and diffusive transport of the toxic substance. Numerical integration of the modeling equations of the mechanics of a solid medium is carried out using finite-difference schemes using the labeling method. **Scientific novelty.** A numerical model was created for forecasting the level of air pollution in the working room due to the emission of toxic gas. The model is based on the numerical integration of the fundamental equations of solid medium mechanics. A feature of the numerical model is the consideration of the main physical factors that affect the spread of toxic gas in the room (the presence of equipment in the room, the position of the ventilation holes, the cities of emission of the toxic substance, etc.) and the speed of calculation. **Practical significance.** The developed numerical model can be used for the scientific substantiation of emergency ventilation parameters for workplaces where the emission of toxic substances is possible. **Conclusions.** A dynamic multifactorial numerical model was developed to analyze and forecast the process of chemical contamination of the workplace. A feature of the numerical model is the possibility to take into account the main physical factors affecting the formation of pollution areas in the workplace. The developed numerical model can be used for scientific substantiation of emergency ventilation parameters for rapid reduction of the concentration of toxic (or explosive) substance in the working room.

Keywords: emergency air pollution; working room; numerical modeling; chemically dangerous substance

Постановка проблеми. Проблема забруднення повітря в робочих приміщеннях є особливо актуальною. В коло практичних задач даного класу входять задачі, що пов'язані з емісією токсичних речовин при екстремальних ситуаціях. При таких ситуаціях можливе дуже швидке ураження персоналу на робочих місцях [1; 5]. Це пов'язано з тим, що при екстремальних ситуаціях в приміщеннях дуже швидко з'являються області інтенсивного хімічного забруднення (рис. 1).

Тому вкрай важливо обґрунтовано визначати параметри аварійної вентиляції, враховуючи те, що в робочих приміщеннях можливо утворення застійних областей. Таке прогнозування можна виконувати на базі математичних моделей [1; 6–8]. Але, зараз в теперішній час існує дефіцит таких моделей, що обумовлює актуальність розробки математичних моделей для рішення задач даного класу.



Рис. 1. Викид в робочому приміщенні
(<https://mexoiloffshore.com.mx/fugas.html>)

Мета статті. Розробка чисельної моделі для прогнозування аварійного забруднення повітря в робочому приміщенні.

Методика. Розрахунок динаміки хімічного забруднення повітря в робочому приміщенні при аварійному викиді хлору базується на чисельному інтегруванні рівнянь аеродинаміки та масопереносу.

Моделюючим рівнянням аеродинаміки є наступне рівняння [2]:

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

Для моделюючого рівняння (1) ставляться відповідні граничні умови:

– на межі, де потік входить у розрахункову область (отвори вентиляції), для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Неймана $\frac{\partial P}{\partial x} = U$, де U –

відоме значення швидкості вітрового потоку;

– на межі, де потік виходить з розрахункової області (відповідні отвори вентиляції), для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Діріхле $P = P_0 + \text{const}$, де P_0 – деяка числова константа;

– на верхній межі, тверда непроникна стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на нижній межі, тверда непрозора стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на всіх твердих стінках (обладнання) виконуватиметься умова непроникнення.

Якщо відомі поля потенціалу швидкості, то для визначення компонент вектора швидкості повітряного потоку використовуються такі залежності [2]:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Чисельне інтегрування моделюючого рівняння (1), а також для чисельного інтегрування інших диференціальних рівнянь моделі вентиляції та масопереносу, використовується прямокутна різницева сітка. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використовується його запис у еволюційному вигляді [4]:

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

де t – фіктивний час, при $t \rightarrow \infty$ розв'язок рівняння (2) наближається до розв'язку рівняння Лапласа (1).

На наступному кроці виконується геометричне розщеплення рівняння (2) наступним чином [4]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (4)$$

Для розрахунку значення потенціалу швидкості P на базі одновимірного рівняння (3) використовується така залежність:

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

Для розрахунку значення потенціалу швидкості P на базі одновимірного рівняння (4) застосовується залежність:

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

Розрахунок здійснюється поки не буде виконана умова:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Процес розповсюдження небезпечної речовини, що потрапляє в повітря робочого приміщення при аварійній емісії моделюється на базі рівняння масопереносу [1–3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (5)$$

де C – концентрація хімічно небезпечної речовини; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку в робочому приміщенні; w_s – швидкість гравітаційного осадження речовини; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; q_i – інтенсивність емісії хімічно

небезпечної домішки; $\delta(x - x_i)(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака; (x_i, y_i) – координати розташування джерела емісії хімічно небезпечної домішки в робочому приміщенні; t – час.

Для чисельного інтегрування рівняння (5) робляться такі перетворення :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u C}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial v C}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ u^+ &= (u + |u|)/2, u^- = (u - |u|)/2, \\ v^+ &= (v + |v|)/2, v^- = (v - |v|)/2, \\ \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}, \\ \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) &\approx \rho_{\alpha} \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \rho_{\alpha} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) &\approx \rho_{\beta} \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \rho_{\beta} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Тоді, можна записати аналог рівняння (1) в різницевому вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} &+ L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + \\ &+ L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ &= (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + \\ &+ M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (6)$$

Параметр δ_{ij} дорівнює 1, якщо в різницевій комірці є джерело забруднення, та 0, якщо в комірці немає джерела забруднення.

Зауважимо, що в даному запису використовується така залежність:

$$q_{ij} = q_i / \Delta x / \Delta y,$$

де q_i – інтенсивність джерела викиду забруднювача.

Далі здійснюється розщеплення рівняння (6) наступним чином [4]:

– крок 1 ($k = 1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} &+ \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + \\ &+ M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (7)$$

– крок 2 ($k = n + 1/2$; $c = n + 1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} &+ \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ &+ M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (8)$$

– крок 3 ($k = n + 3/4$; $c = n + 1/2$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} &+ \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + \\ &+ M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (9)$$

– крок 4 ($k = n + 1$; $c = n + 3/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} &+ \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + \\ &+ M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l. \end{aligned} \quad (10)$$

Особливістю розглянутої схеми розщеплення є те, що на кожному розрахунковому кроці, концентрація хімічно небезпечної речовини визначається за явною формулою.

На наступному етапі була здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу.

Результати. На базі розроблених чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу був проведений обчислювальний експеримент. Схема розрахункової області показана на рисунку 2. В робочому приміщенні розглядалася аварійна емісія хлору в двох

містах. Аварійна емісія здійснювалася на протязі 1,5 с, а далі викид припиняється. В робочому приміщенні повітря потрапляє через отвір, що розташований на полу, вихід повітря з робочого приміщення здійснюється через отвір на стелі та через отвір на правій стінці приміщення. Це показано умовно «стрілками» на рисунку 2.

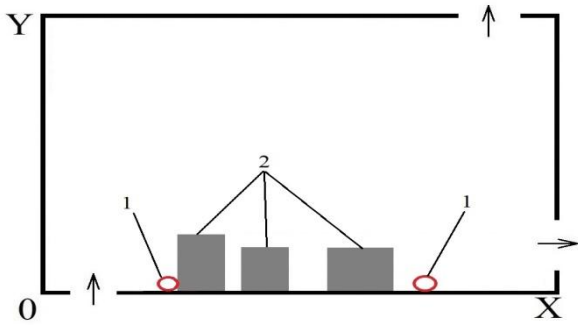


Рис. 2. Розрахункова схема: 1 – місце аварійного витока хлору; 2 – устаткування

Інтенсивність емісії хлору дорівнює 1 г/с , $w_s = 0,01\text{ м/с}$, розміри розрахункової області $10 \times 5\text{ м}$. Кратність повітрообміну дорівнює 7. При проведенні розрахунків для визначення величини коефіцієнтів дифузії використовувалися залежності:

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

Результати рішення задачі показані в двох виглядах: матриці розподілу концентрації хлору в робочому приміщенні (рис. 3–6) та у вигляді ізоліній концентрації хлору (рис. 7–10). Матриці дають можливість швидко отримати «кількісну» оцінку рівня хімічного забруднення повітря в робочому приміщенні, або в деякій області приміщення, та зміну цього рівня з часом. Результати моделювання, що показані у вигляді ізоліній (рис. 6–8) дають можливість швидко визначити форму зони хімічного забруднення та вплив обладнання на «деформацію» зони забруднення.

На рисунках-матрицях показано поле концентрації хлору в безрозмірному вигляді. Кожне число на рисунку показує значення концентрації у відсотках від $C_{\max}$ (максимальна концентрація). Максимальна

концентрація хлору змінюється з часом у робочому приміщенні.

На рисунках 2–10 показано, як змінюється форма області забруднення в робочому приміщенні для різних моментів часу після аварії. На рисунках 2–6 показано поле концентрації хлору в безрозмірному вигляді. Кожне число на рисунку показує значення концентрації у відсотках від максимального її значення на даний момент часу.



Рис. 3. Область забруднення в робочому приміщенні $t = 0,24\text{ с}$, $C_{\max} = 0,61\text{ г/м}^3$



Рис. 4. Область забруднення в робочому приміщенні, $t = 0,71\text{ с}$, $C_{\max} = 0,87\text{ г/м}^3$

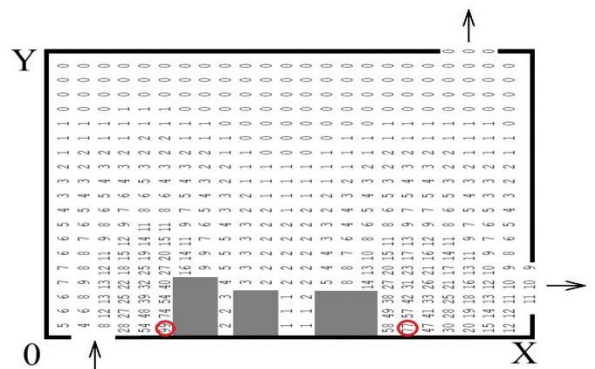


Рис. 5. Область забруднення в робочому приміщенні $t = 1,19\text{ с}$, $C_{\max} = 0,98\text{ г/м}^3$

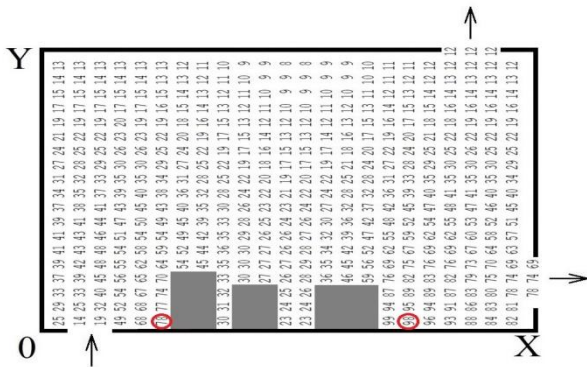


Рис. 6. Область забруднення в робочому приміщенні $t = 2,15$ с, $C_{\max} = 0,28$ г/м³

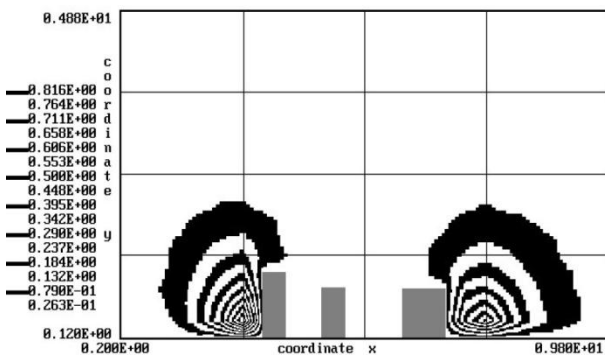


Рис. 7. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 0,49$ с

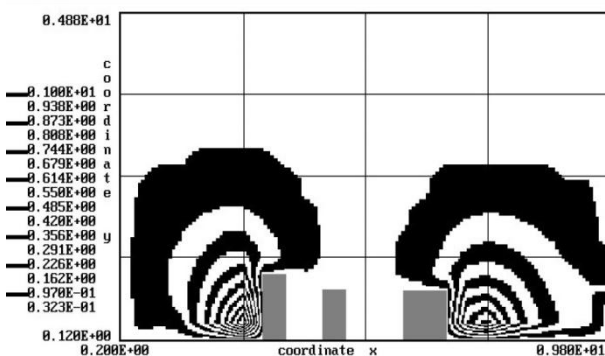


Рис. 8. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 1,09$ с

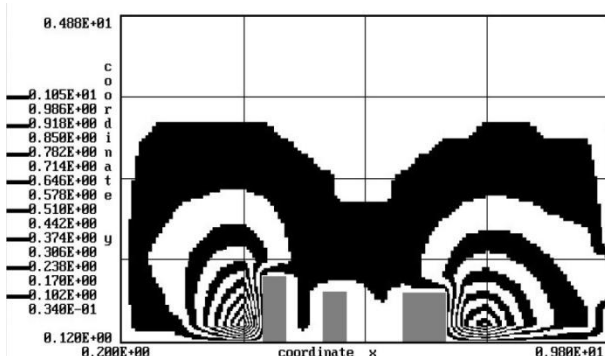


Рис. 9. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 1,49$ с

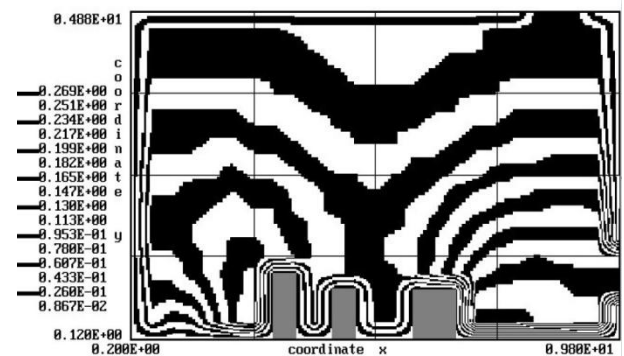


Рис. 10. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 2,39$ с

Як можна бачити з рисунків, спочатку, в приміщенні формуються дві області забруднення, які збільшуються в розмірах, з часом. До моменту часу $t = 1,49$ с ці області «об'єднуються» в одну велику область. Тобто, можна константувати, що при аварійному витокі усе приміщення буде наповнено токсичним газом. Концентрація токсичного газу буде значно перевищувати ГДК.

На рисунку 11 показана зміна максимальної концентрації хлору в приміщенні для різних моментів часу.

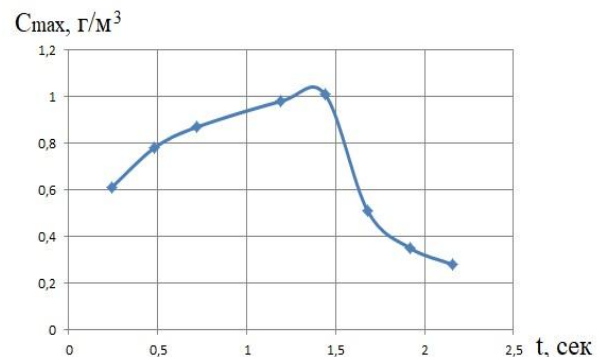


Рис. 11. Зміна максимальної концентрації хлору в приміщенні

Як можна бачити з рисунка 11, з часом має місце падіння концентрації хлору, що пов'язано з припиненням витоків хімічно небезпечної речовини. Різде зменшення концентрації хлору, майже втричі за 1,5 с після припинення дії джерела забруднення. Це обумовлено дією аварійної вентиляції. Час розрахунку складає 5 с.

Наукова новизна та практична цінність. Створена чисельна модель для прогнозування рівня забруднення повітря в

робочому приміщенні внаслідок емісії токсичного газу.

Модель базується на чисельному інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Особливістю чисельної моделі є врахування основних фізичних факторів, що впливають на розповсюдження токсичного газу в приміщенні (наявність обладнання в приміщенні, положення отворів вентиляції, міста емісії токсичної речовини тощо) та швидкість розрахунку.

Висновки

1. Для аналізу та прогнозу процесу хімічного забруднення робочого

приміщення розроблена динамічна багатофакторна чисельна модель.

2. Особливістю чисельної моделі є можливість враховувати основні фізичні фактори, що впливають на формування областей забруднення в робочих приміщеннях.

3. Розроблена чисельна модель може бути використана для наукового обґрунтування параметрів аварійної вентиляції для швидкого зниження концентрації токсичної (або вибухонебезпечної) речовини в робочому приміщенні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Якубовская З. Н. Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды в помещениях. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 123 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
5. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. Москва : Химия, 1980. 288 с.
6. Huang Shuguang Experimental and numerical study on personalized ventilation coupled with displacement ventilation. Thesis, National University of Singapore. 2011. 140 p.
7. Min Zhang, Bin Zhao. Numerical simulation of air distribution's impact on indoor air quality. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 51. 2016. 6 p.
8. Yang Li. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. 2012. Vol. 4, № 12. Pp. 1352–1361.

REFERENCES

1. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V. and Yakubovska Z.N. *Prognozirovaniye urovnya zagryazneniya vozdushnoy sredy v pomeshcheniyakh* [Predicting the level of indoor air pollution]. Dnepropetrovsk : "Aktsent PP", 2015, 123 p. (in Russian).
2. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoye modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
3. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in environmental problems]. Moscow : Nauka Publ., 1982, 320 p. (in Russian).
4. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
5. Elterman V.M. *Ventilyatsiya khimicheskikh proizvodstv* [Ventilation of chemical production facilities]. Moscow : Khimiya publ., 1980, 288 p. (in Russian).
6. Huang Shuguang. Experimental and numerical study on personalized ventilation coupled with displacement ventilation. Thesis, National University of Singapore. 2011, 140 p.
7. Min Zhang and Bin Zhao. Numerical simulation of air distribution's impact on indoor air quality. *Chemical Engineering Transactions*. 2016, vol. 51, 6 p.
8. Yang Li. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. 2012, vol. 4, no. 12, pp. 1352–1361.

Надійшла до редакції: 11.10.2024.

УДК 519.6:628.33

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.55.1111

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ НА БАЗІ ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ТИМОШЕНКО О. А.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
КАЛАШНИКОВ А. В.³, *асп.*,
КОВАЛЕНКО А. С.⁴, *асп.*,
ЧІРКОВ А. О.⁵, *асп.*

¹ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

³ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-8671-0446

⁴ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-9761-4300

⁵ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-5892

Анотація. *Постановка проблеми.* Аеротенки та відстійники найбільш поширено використовуються в технологічних схемах очищення стічних вод. Важливою проблемою є розробка ефективних спеціалізованих математичних моделей для аналізу ефективності роботи цих споруд водовідведення. **Мета роботи.** Розробка чисельних моделей для розрахунку процесів масопереносу у біологічних реакторах та відстійниках систем водовідведення. **Методика.** Для опису процесів механічного та біологічного очищення стічних вод використовуються фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища. Для моделювання процесу переносу активного мулу, кисню та субстрату в біологічному реакторі використовуються тривимірні рівняння масопереносу. Для опису руху забруднювача у відстійнику використовується 3D рівняння конвективно-дифузійного переносу вагової консервативної домішки. Гідродинаміка в очисних спорудах описується просторовим рівнянням Лапласу для потенціала швидкості. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використовуються кінцево-різницеві схеми. **Наукова новизна.** В статті розглянуті чисельні моделі для визначення концентрації кисню, активного мулу, субстрату в біореакторі. Запропоновані чисельні моделі для аналізу ефективності процесу очищення стічних вод у відстійниках. Побудовані чисельні моделі визначення поля швидкості потоку стічних вод в біореакторах та відстійниках. Запропоновані математичні моделі можуть бути використані для оцінювання ефективності роботи споруд, що здійснюють механічне та біологічне очищення стічних вод. **Практична значущість.** Запропоновані чисельні моделі для визначення поля швидкості в аеротенках та відстійниках, а також чисельні моделі для рішення задач оцінювання ефективності очищення стічних вод в цих спорудах. Розроблені чисельні моделі дозволяють швидко, в режимі «on-line», вирішувати прикладні задачі. **Висновки.** Здійснена програмна реалізація розробленої чисельної моделі. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: *очистка стічних вод; біореактор; відстійник; чисельне моделювання; водокористування*

ANALYSIS OF MASS TRANSFER PROCESSES BASED ON NUMERICAL MODELS

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
TYMOSHENKO O.A.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KALASHNYKOV A.V.³, *Postgrad. Stud.*,
KOVALENKO A.S.⁴, *Postgrad. Stud.*,
CHIRKOV A.O.⁵, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} Department of Ecology and Environmental Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

³ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-8671-0446

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-9761-4300

⁵ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7467-5892

Abstract. Problem statement. Aeration tanks and settling tanks are most commonly used in wastewater treatment processes. An important problem is the development of effective specialized mathematical models for analyzing the efficiency of these wastewater treatment facilities. *The purpose of the article.* Development of numerical models for calculating mass transfer processes in biological reactors and settling tanks of wastewater systems. **Methodology.** To describe the processes of mechanical and biological wastewater treatment, fundamental equations of continuum mechanics are used. To model the process of activated sludge, oxygen and substrate transport in a biological reactor, three-dimensional mass transfer equations are used. To describe the movement of a pollutant in a settling tank, a 3D equation of convective-diffusion transport of a significant conservative impurity is used. Hydrodynamics in treatment plants is described by the spatial Laplace equation for the velocity potential. Finite-difference schemes are used for numerical integration of the modeling equations. **Scientific novelty.** The article considers numerical models for determining the concentration of oxygen, activated sludge, substrate in a bioreactor. Numerical models are proposed for analyzing the efficiency of the wastewater treatment process in settling tanks. Numerical models are built for determining the field of wastewater flow velocity in bioreactors and settling tanks. The proposed mathematical models can be used to assess the efficiency of structures that carry out mechanical and biological wastewater treatment. **Practical significance.** Numerical models for determining the velocity field in aeration tanks and settling tanks, as well as numerical models for solving problems of assessing the efficiency of wastewater treatment in these structures, are proposed. The developed numerical models allow for quick, on-line, solution of applied problems. **Conclusions.** The developed numerical model has been implemented in software. The results of the computational experiment are presented.

Keywords: wastewater treatment; bioreactor; settling tank; numerical modeling; water use

Постановка проблеми. Очистка стічних вод є дуже особо важливою проблемою в галузі водокористування [1–5; 6; 7; 13]. Для вирішення різноманітних задач очищення стічних вод використовуються різні споруди. Практично усі технологічні схеми очищення включають аеротенки та відстійники. На етапі проектування даних споруд очистки стічних вод потрібно мати спеціальні математичні моделі, а саме:

– емпіричні моделі, що базуються на використанні спрощених алгебраїчних співвідношень та використовуються в нормативних та інженерних методиках [2–4];

– аналітичні моделі, що базуються на використанні точних рішень рівнянь масопереносу [5; 12];

– CFD моделі, що базуються на використанні чисельних моделей гідродинаміки та масопереносу [1; 9–12].

Незважаючи на значну кількість математичних моделей, можна зазначити, що у зв'язку з дуже широким колом існуючих аеротенків, відстійників, залишається проблема створення ефективних математичних моделей для аналізу їх роботи.

Мета статті – розробка чисельних моделей для розрахунку процесів масопереносу у біологічних реакторах та відстійниках систем водовідведення.

Методика. Для опису процесів механічного та біологічного очищення стічних вод використовуються фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища [1].

Математична модель кисневого режиму в споруді біологічного очищення стічних вод

Процес очистки стічних вод в аеротенку описується наступними рівняннями масопереносу :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial uX}{\partial x} + \frac{\partial vX}{\partial y} + \frac{\partial wX}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial X}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial DO}{\partial t} + \frac{\partial uDO}{\partial x} + \frac{\partial vDO}{\partial y} + \frac{\partial wDO}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial DO}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial DO}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial DO}{\partial z} \right) +$$

$$+ K_{La}(DO_{\max} - DO) + \frac{K_0 \mu X}{Y}, \quad (3)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y} X \quad (5)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s} \cdot \frac{DO}{k_{DO} + DO},$$

де t – час; $X(x, y, z, t)$ – концентрація активного мулу в біореакторі; $S(x, y, z, t)$ – концентрація субстрату в біореакторі; K_d – коефіцієнт, що враховує швидкість вимирання біомаси; DO – концентрація кисню в стічній воді; $DO_{\max}$ – максимальне значення концентрації кисню в стічних водах; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти дифузії відповідно у напрямку x, y, z ; $u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$ – компоненти швидкості водного потоку в біореакторі; $K_0, K_s, K_{La}, \mu_{\max}, k_{DO}, Y$ – параметри [1].

Краєві умови для моделюючих рівнянь наведені в [1].

Чисельне інтегрування рівнянь (4), (5) здійснюється за допомогою метода Ейлера. Рішення моделюючих рівнянь (1)–(3) здійснюється за допомогою кінцево-різницевої схеми. Приклад такої схеми наведено нижче для узагальненого рівняння масопереносу, де C – це концентрація речовини в біореакторі (кисень, субстрат, активний мул) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (6)$$

Розглянемо апроксимацію похідних, що входять в рівняння масопереносу (6). Конвективні похідні представимо у вигляді [1] :

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2}; v^+ = \frac{v + |v|}{2};$$

$$v^- = \frac{v - |v|}{2}; w^+ = \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

Для апроксимації конвективних похідних використовуємо вирази [1] :

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1},$$

$$\text{де } L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x},$$

$$L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x}, \quad L_y^+, L_y^-, L_z^+, L_z^- -$$

позначення різницевої операторів при апроксимації конвективних похідних.

Другі похідні апроксимуємо наступними виразами [1] :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} =$$

$$= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) &\approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta z^2} - \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = \\ &= M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.\end{aligned}$$

В даних виразах:

$$M_{xx}^+ = -\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, M_{xx}^- = \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2},$$

M_{yy}^+ , M_{yy}^- , M_{zz}^+ , M_{zz}^- – позначення різницевого оператора при апроксимації других похідних.

З урахуванням цих позначень, різницевий аналог тривимірного рівняння переносу домішки матиме вигляд:

$$\begin{aligned}&\frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + \\ &+ L_y^- C^{n+1} + L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{ijk}^{n+1} = \\ &= \left(M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + \right. \\ &\quad \left. + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1} \right).\end{aligned}$$

Похідна за часом представляється так:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

При інтегруванні на часовому інтервалі dt виконаємо розщеплення даного рівняння наступним чином:

– на першому часовому кроці $k = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned}&\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \\ &+ \frac{1}{2} \left(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \quad (7) \\ &= \frac{1}{4} \left(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + \right. \\ &\quad \left. + M_{yy}^- C^n + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n \right),\end{aligned}$$

– на другому часовому кроці $k = n + \frac{1}{2}$:

$$c = n + \frac{1}{4};$$

$$\begin{aligned}&\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^c}{\Delta t} + \\ &+ \frac{1}{2} \left(L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \quad (8)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= \frac{1}{4} \left(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + \right. \\ &\quad \left. + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c \right),\end{aligned}$$

– на третьому часовому кроці $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$ використовується формула

(8),

– на четвертому часовому кроці $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$ використовується формула

(7).

Переваги розглянутої математичної моделі:

1. можливість здійснювати просторове дослідження процесу біологічного очищення стічних вод в реакторі;

2. можливість аналізувати процес очищення для різних моментів часу.

Недоліки:

1. неможливість аналізувати ефективність очищення стічних вод для рухомого біоценозу;

2. неможливість моделювання турбулентної течії;

3. розглянута різницева схема має перший порядок точності.

Математична модель масопереносу у відстійнику

Для аналізу ефективності роботи горизонтальних або вертикальних відстійників використовується наступна 3D модель масопереносу:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)S}{\partial z} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right),\end{aligned}$$

де S – концентрація домішки у відстійнику; w_g – швидкість гравітаційного осадження домішки в споруді.

Постановка краєвих умов для даного моделюючого рівняння наведена в [1].

Дане рівняння масопереносу

розщеплюється на систему одновимірних рівнянь наступним чином :

$$\begin{aligned}\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial wS}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right).\end{aligned}\quad (9)$$

Кожне рівняння з даної системи описують процес переносу субстрату в напрямках «Х» та «Y», «Z».
Різницеви рівняння, що дають можливість розв'язати систему рівнянь (9), такі :

– крок № 1 для першого рівняння:

$$\begin{aligned}S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j,k}^n - Vt \frac{u_{i+1,j,k}^+ S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j,k}^+ S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{Vx} + \\ &+ Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{Vx^2} + Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^n + S_{i+1,j,k}^n}{Vx^2};\end{aligned}\quad (10)$$

– крок № 2 для першого рівняння:

$$\begin{aligned}S_{i,j,k}^{n+1} &= S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{u_{i+1,j,k}^- S_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- S_{i-1,j,k}^{n+1}}{Vx} + \\ &+ Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{Vx^2} + Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+1} + S_{i+1,j,k}^{n+1}}{Vx^2},\end{aligned}\quad (11)$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

– крок № 1 для другого рівняння:

$$\begin{aligned}S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j,k}^n - Vt \frac{v_{i,j+1,k}^+ S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j,k}^+ S_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{Vy} + \\ &+ Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{Vy^2} + Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^n + S_{i,j+1,k}^n}{Vy^2};\end{aligned}\quad (12)$$

– крок № 2 для другого рівняння:

$$\begin{aligned}S_{i,j,k}^{n+1} &= S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{v_{i,j+1,k}^- S_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- S_{i,j-1,k}^{n+1}}{Vy} + \\ &+ Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{Vy^2} + Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+1} + S_{i,j+1,k}^{n+1}}{Vy^2},\end{aligned}\quad (13)$$

$$\text{де } v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

– крок № 1 для третього рівняння:

$$\begin{aligned}S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j,k}^n - Vt \frac{w_{i,j,k+1}^+ S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - w_{i,j,k}^+ S_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{Vz} + \\ &+ Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{Vz^2} + Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^n + S_{i,j,k+1}^n}{Vz^2};\end{aligned}\quad (14)$$

– крок № 2 для третього рівняння:

$$\begin{aligned}S_{i,j,k}^{n+1} &= S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{w_{i,j,k+1}^- S_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^- S_{i,j,k-1}^{n+1}}{Vz} + \\ &+ Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{Vz^2} + Vt \mu \frac{-S_{i,j,k}^{n+1} + S_{i,j,k+1}^{n+1}}{Vz^2},\end{aligned}\quad (15)$$

$$\text{де } w^- = \frac{w - |w|}{2}, \quad w^+ = \frac{w + |w|}{2}.$$

Перевагами розглянутої математичної моделі є :

1. можливість здійснювати 3D дослідження процесу очищення стічних вод у відстійниках з урахуванням конвективно-дифузійного переносу домішки;

2. можливість динаміки осадження домішки у відстійниках для різних моментів часу.

Недоліки :

1. неможливість моделювання турбулентної течії;

2. розглянута різницева схема має перший порядок точності.

Для практичної реалізації розглянутих чисельних моделей потрібно визначити поле швидкості води в споруді, тобто вирішити задачу гідродинаміки.

Модель гідродинаміки. Для визначення поля швидкості потоку в спорудах використовується рівняння Лапласа для потенціалу швидкості :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \quad (16)$$

Компоненти вектора швидкості визначаються так :

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (17)$$

Граничні умови для рівняння Лапласу розглянуті в [1].

Для чисельного розв'язання задачі

гідродинаміки використовуються дві кінцево-різницевої схеми. Перша схема – це позмінно-трикутний метод А. А. Самарського. Для використання даного методу рівняння Лапласу приводиться до вигляду :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}. \quad (18)$$

Для чисельного інтегрування даного рівняння з еволюційною похідною використовується схема :

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{0,5\Delta\eta} &= \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j+1,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}, \\ \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} &= \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}. \end{aligned}$$

На кожному дробовому кроці невідоме значення P визначається за явною схемою рахунку, що біжить, що робить розрахунок економічним і зручним для програмування.

Друга схема – це локально одновимірною схема розв'язання рівняння Лапласу для потенціалу швидкості. На першому кроці здійснюються наступні перетворення. Знову, представимо це рівняння у вигляді :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (19)$$

де t – фіктивний час.

Далі, рівняння (19) розщеплено так :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}. \quad (20)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (22)$$

Розрахункові залежності (метод

Річардсона) для визначення невідомого значення P на базі рівняння (20) мають вигляд :

$$\begin{aligned} P_{i,j,k}^{n+1} &= P_{i,j,k}^n + Vt \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ &+ Vt \frac{-P_{i,j,k}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Розрахункові залежності для визначення невідомого значення P на базі рівняння (21) мають вигляд :

$$\begin{aligned} P_{i,j,k}^{n+1} &= P_{i,j,k}^n + Vt \frac{P_{i,j+1,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} + \\ &+ Vt \frac{-P_{i,j,k}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Розрахункові залежності для визначення невідомого значення P на базі рівняння (22) мають вигляд :

$$\begin{aligned} P_{i,j,k}^{n+1} &= P_{i,j,k}^n + Vt \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} + \\ &+ Vt \frac{-P_{i,j,k}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Розрахунок за даними залежностями закінчується коли виконується умова :

$$|P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n| \leq \varepsilon, \quad (26)$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

На наступному етапі визначається швидкість течії :

$$\begin{aligned} u &= \frac{P_{i+1,j,k} - P_{i,j,k}}{\Delta x}, \quad v = \frac{P_{i,j+1,k} - P_{i,j,k}}{\Delta y}, \\ w &= \frac{P_{i,j,k+1} - P_{i,j,k}}{\Delta z}. \end{aligned}$$

Для кодування різницевої рівнянь використовувався FORTRAN.

Перевагами розглянутих математичних моделей є :

1. можливість визначати 3D поле швидкості потоку в спорудах;
2. можливість вирішувати задачу гідродинаміки за декілька секунд.

Недоліки :

1. неможливість моделювання турбулентної течії;

2. неможливість визначати відривні зони.

Результати. Нижче наведені результати рішення двох модельних задач на базі розроблених чисельних моделей. Перша задача – визначення поле концентрації кисню в аеротенку при розташуванні в споруді. Розрахунок здійснювався при таких параметрах: розрахунки виконувалися при наступних вхідних даних: $S_{in} = 130$ мг/л – концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє в споруду; розміри біореактору $1 \times 0,5 \times 0,3$ (в безрозмірному вигляді); $Q_s(t) = 1100$ м³/доб. – витрата стічних вод; $\mu_x = \mu_y = 2 \cdot 10^{-4}$ м²/доб.; $X_{in} = 210$ мг/л – концентрація активного мулу, що потрапляє в реактор; $\mu_{max} = 1,04$ – параметр; $K_s = 100$ мг/л – параметр; $K_d = 0,055$ 1/доб. – коефіцієнт, що враховує загибель мікроорганізмів; $Y = 0,55$ – параметр; початкові умови: $S_0 = 140$ мг/л, $X_0 = 205$ мг/л – концентрація субстрату та активного мулу в реакторі для моменту часу $t = 0$, інтенсивність подачі кисню від кожного аератору 1 (в безрозмірному вигляді). В аеротенку розташовано 6 аераторів, схема їх розташування показана на рисунку 1.

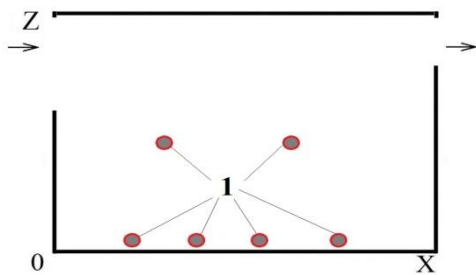


Рис. 1. Розрахункова схема біореактору:
1 – аератор

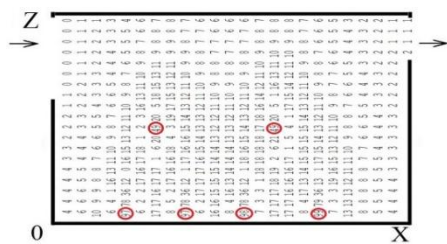


Рис. 2. Поле концентрації розчинного кисню в біореакторі

На рисунку 2 показано поле безрозмірне значення концентрації кисню в перерізі $y = 0,25$. Кожне число на рисунку 2 показує безрозмірне значення концентрації кисню у відсотках від максимальної концентрації в даному перерізі.

Як можна бачити з рисунку 2 розроблена чисельна модель дозволяє визначити «радіус впливу» кожного аератору та визначити область, де має місце суперпозиція полів концентрації кисню при близькому розташуванні аераторів. Таким чином, використовуючи розроблену чисельну модель можна визначити раціональне розташування аераторів у споруді, щоб забезпечити потрібну концентрацію кисню в біореакторі. Час розрахунку даного класу задач – 4 с.

На рисунку 3 показана розрахункова схема в задачі при моделюванні процесу осадження домішки у відстійнику з додатковим елементом – екраном. Як можна бачити з рисунку 3 екран має складну геометричну форму. Розміри розрахункової області $1 \times 0,5 \times 0,3$ (в безрозмірному вигляді), швидкість осадження домішки 0,001 мм/с. Швидкість води на вході у відстійник 0,01 м/с.

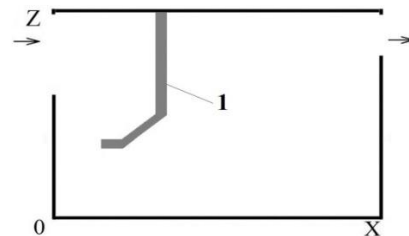


Рис. 3. Розрахункова схема відстійника: 1 – екран

На рисунку 4 показано поле безрозмірної концентрації домішки у відстійнику в перерізі $y = 0,25$. Як і вище, це концентрація у відсотках від максимальної концентрації в даному перерізі.

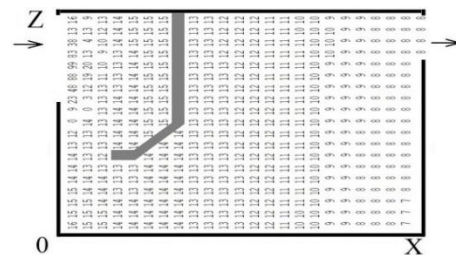


Рис. 4. Безрозмірне значення концентрації вагової домішки у відстійнику

З рисунку 4 можна бачити, що використання екрану дає можливість забезпечити ефективне осадження домішки у споруді. Так, якщо максимальна концентрація домішки має місце на вході у споруду 99 %, то вже за екраном, ця концентрація дорівнює 13 %.

Відзначимо, що час розрахунку кожного сценарію був 4 с.

Наукова новизна та практична цінність. В статті розглянуті чисельні моделі для визначення концентрації кисню, активного мулу, субстрату в біореакторі.

Запропоновані чисельні моделі для аналізу ефективності процесу очищення стічних вод у відстійниках.

Побудовані чисельні моделі визначення поля швидкості потоку стічних вод в

біореакторах та відстійниках.

Запропоновані математичні моделі можуть бути використані для оцінювання ефективності роботи споруд водовідведення.

Висновки

1. У статті розглянуті багатofакторні математичні моделі біологічного очищення стічних вод в аеротенках та осадження домішки у відстійниках.

2. Запропоновані чисельні моделі для визначення поля швидкості в аеротенках та відстійниках, що дозволяють швидко, в режимі «on-line», вирішити задачу гідродинаміки.

3. Розглянуті переваги та недоліки побудованих математичних моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М. М., Козачина В. А., Гунько О. Ю., Лемеш М. В. Комп'ютерне моделювання процесів біологічної очистки стічних вод. Дніпро : Журфонд, 2023. 186 с.
2. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «Укрґеліотек», 2010. 272 с.
3. Карелин Я. А., Жуков Д. Д., Журов В. Н., Репин Б. Н. Очистка производственных сточных вод в аеротенках. Москва : Стройиздат, 1973. 223 с.
4. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калицун В. И. Примеры расчетов канализационных сооружений. Москва : Высшая школа, 1981. 237 с.
5. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очисних стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України*. 2015. № 5. С. 55–60.
6. Alharbi A. O. M. The biological treatment of wastewater : mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94, iss. 2. Pp. 347–348. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0004972716000411>.
7. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic bio-film Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10, iss. 1. Pp. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>.
8. Dapelo D., Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81, iss. 8. Pp. 1646–1657. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086>.
9. Gao H., Stenstrom M. K. Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades. A review. *Water Environment Research*. 2019. Vol. 92, iss. 6. Pp. 796–820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279>.
10. Gao H., Stenstrom M. K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks : Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146, iss. 5. Pp. 04020028-1–04020028-12. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689).
11. Mocanu C. R., Mihaillescu R. Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*. 2012. Vol. 74, iss. 2. Pp. 191–198.
12. Pereda M., Zamarreno J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterrian Conference on Control and Automation Aquis*. 2011. Pp. 1128–1133. URL: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>.
13. Vilanova R., Rojas J. D., Alfaro V. M. Digital Control of a Waste Water Treatment Plant. *Int. J. of Computers, Communications & Control*. 2011. Vol. VI, no. 2 (June). Pp. 367–374.

REFERENCES

1. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A., Gunko O.Yu. and Lemesh M.V. *Kompyuterne modelyuvannya pro-cesiv biologichnoyi ochystky stichnykh vod : monografiya* [Computer modeling of biological wastewater treatment processes : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2023, 186 p. (in Ukrainian).
2. Vasylenko O.A., Hrabovskyi P.O., Larkina H.M., Polishchuk O.V. and Prohulnyi V.Y. *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: navchalnyi posibnyk* [Reconstruction and intensification of water supply and drainage facilities]. Kyiv : IVNVKP "Ukrheliotek" Publ., 2010, 272 p. (in Ukrainian).
3. Karelin Ya.A., Zhukov D.D., Zhurov V.N. and Repin B.N. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkakh* [Treatment of industrial wastewater in aerotanks]. Moscow : Stroiyzdat Publ., 1973, 223 p. (in Russian).
4. Laskov Yu.M., Voronov Yu.V. and Kalicun V.I. *Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzhenij* [Examples of calculations of sewer structures]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1981, 237 p. (in Russian).
5. Oleynik O.Ya. and Airapetyan T.S. *Modelyuvannya ochysnykh stichnykh vod vid orhanichnykh zabrudnen' v bioreaktorakh-aerotenkakh zi zvazhenym (vil'no plavayuchym) i zakriplenym biotsenozom. Dopovid' NAN Ukrayiny* [The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 5, pp. 55–60. (in Ukrainian).
6. Alharbi A.O.M. The biological treatment of wastewater: mathematical models. Bulletin of the Australian Mathematical Society. 2016, no. 94 (2), pp. 347–348. URL: <https://doi.org/10.1017/s0004972716000411>.
7. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N. and Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow An-aerobic biofilm Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2013, no. 10 (1), pp. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>.
8. Dapelo D. and Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. Water Science & Technology. 2020, no. 81 (8), pp. 1646–1657. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086>.
9. Gao H. and Stenstrom M.K. Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades : a review. Water Environment Research. 2019, no. 92 (6), pp. 796–820. URL: <https://doi.org/10.1002/wer.1279>.
10. Gao H. and Stenstrom M.K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks : Computational Fluid Dynamics Study. Journal of Environmental Engineering. 2020, no. 146 (5), pp. 04020028-1-04020028-12. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689).
11. Mocanu C.R. and Mihaillescu R. Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. U. P. B. Sci. Bull., Series D. 2012, no. 74 (2), pp. 191–198.
12. Pereda M. and Zamarreno J.M. Agent-based modeling of an activated sludge process in batch reactor. 19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis. 2011, pp. 1128–1133. URL: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>.
13. Vilanova R., Rojas J.D. and Alfaro V.M. Digital Control of a Waste Water Treatment Plant. Int. J. of Computers, Communications & Control. 2011, vol. VI, no. 2 (June), pp. 367–374. doi: 10.15837/ijccc.2011.2.2184.

Надійшла до редакції: 01.11.2024.

УДК 669.14:621.785.33.001.2

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.64.1112

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ

ГУЛЬ Ю. П.¹, канд. тех. наук, проф.,
СОБОЛЕНКО М. О.^{2*}, ст. викл.

¹ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, Дніпровський металургійний інститут, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

^{2*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, Дніпровський металургійний інститут, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 561-15-31, e-mail: tom.sobolenko.maria@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8653-5262

Анотація. Актуальність роботи. Використання економно легованих боровмісних сталей, істотно розширює обсяги виробництва високоміцних виробів, одержуваних методами холодного об'ємного штампування. Існуючі способи підготовки металу до холодної пластичної деформації включають операцію сфероїдизуючого відпалу, що характеризується високими енергетичними та тимчасовими витратами. Крім цього традиційні способи підготовки низьковуглецевих сталей до холодної деформації мають такі недоліки: великі витрати електроенергії та газу при відпалі в печах, невисока продуктивність, складність забезпечення рівномірного нагріву та охолодження металевих заготовок, а також забруднення навколишнього середовища. Перспективний напрямок – електротермічна обробка сталевих заготовок, відмінною особливістю якої є високі швидкості нагріву металу. Для розробки швидкісних режимів сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей потрібне знання закономірностей формування структури та властивостей при нагріві та охолодженні. **Мета дослідження.** Дослідження критичних точок та виявлення особливостей впливу швидкостей охолодження недеформованого аустеніту на об'ємну частку структурних складових сталі 20Г2Р. **Методика.** При вивченні закономірностей структуроутворення використовували диференційно-термічний метод з подальшим дослідженням мікроструктури та твердості зразків сталі. **Результати.** Одержано кількісну та якісну картину структуроутворення при нагріві та охолодженні боровмісних сталей. Експериментально підтверджено можливість розробки швидкісних режимів сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей з отриманням рівномірного розподілу глобулей цементиту у феритній матриці. Проведені дослідження і аналіз отриманих даних дозволив виконати графічний аналіз структуроутворення досліджуваних сталей вказаного хімічного складу та отримати кількісний вміст структурних складових при охолодженні з різними швидкостями недеформованого аустеніту сталі. Отримані результати експериментальних досліджень структуроутворення можуть бути використані для розроблення різних режимів термічної обробки з окремого нагріву боровмісних сталей.

Ключові слова: відпал сталі заготовки; механічні властивості; температурний режим; швидкість охолодження; структуроутворення; термомікнетична діаграма; кінетика перетворень недеформованого аустеніту

INVESTIGATION OF THE PATTERNS OF STRUCTURE FORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS DURING HEAT TREATMENT

GUL Yu.P.¹, Cand. Sc. (Tech.), Prof.,
SOBOLENKO M.A.^{2*}, Sen. Lect.

¹ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro Metallurgical Institute, 4, Gagarina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

^{2*} Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro Metallurgical Institute, 4, Gagarina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 561-15-31, e-mail: tom.sobolenko.maria@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8653-5262

Abstract. The relevance of the work. The use of economically alloyed boron-containing steels significantly expands the production volumes of high-strength products obtained by cold bulk stamping methods. Existing methods for preparing metal for cold plastic deformation include the operation of spheroidizing annealing, which is characterized by high energy and time expenditures. Additionally, traditional methods of preparing low-carbon steels for cold deformation have several drawbacks: high consumption of electricity and gas during annealing in furnaces, low productivity, difficulty in ensuring uniform heating and cooling of metal blanks, and environmental pollution. A promising direction is the electrothermal treatment of steel blanks, distinguished by high metal heating rates. To develop high-speed spheroidizing annealing regimes for low-carbon steels, it is necessary to understand the laws governing the formation of structure and properties during heating and cooling. **Purpose.** To investigate critical points and identify the peculiarities of the influence of cooling rates of undeformed austenite on the volumetric fraction of structural components of 20Mn2B steel. **Methodology.** In studying the regularities of structure formation, the differential thermal method was used, followed by the investigation of the microstructure and hardness of steel samples. **The results.** A quantitative and qualitative picture of structure formation during heating and cooling of boron-containing steels was obtained. The possibility of developing high-speed spheroidizing annealing regimes for low-carbon steels with the achievement of a uniform distribution of cementite globules in the ferritic matrix was experimentally confirmed. Conducted research and analysis of the obtained data allowed for graphical analysis of the structure formation of the studied steels of the specified chemical composition and to obtain the quantitative content of structural components during cooling at different speeds of undeformed austenite of the steel. The results of experimental studies of structure formation can be used to develop various regimes of thermal treatment with separate heating of boron-containing steels.

Keywords: annealing of steel billet; mechanical properties; temperature regime; cooling rate; structure formation; thermokinetic diagram; kinetics of transformations of underformed austenite

Вступ. Економнолеговані боровмісні сталі, наприклад сталь марки 20Г2Р, наразі служать перспективним матеріалом для виробництва високоміцних кріпильних виробів. Експлуатаційні характеристики боровмісних сталей у багатьох випадках не поступаються, а в низці випадків перевершують рівень властивостей сталей, які леговані дорого вартісними елементами [1]. Використання боровмісних сталей дозволяє збільшити обсяги виробництва високоміцних виробів, що виготовляються методами холодного об'ємного штампування (ХОШ). Підвищення надійності металевих виробів і конструкцій з них у поєднанні зі зниженням металоємності шляхом надання сталі заготовкам відповідної структури і необхідних властивостей під час термічного оброблення, належать до найважливіших завдань, які наразі стоять перед металознавцями та фахівцями з термічної обробки металу.

Технологія виготовлення високоміцних кріпильних виробів розвивається у напрямку збільшення граничного ступеня деформації заготовок (сортового металопрокату) для ХОШ за істотними ускладненнями форми кріпильних виробів. Тому до структури і властивостей сталей,

що використовуються для виробів цього класу, висуваються додаткові вимоги, а саме однорідність механічних властивостей, підвищений ресурс пластичності та однорідність структури.

Мета дослідження. Конструкційні сталі для холодної висадки повинні мати у початковому стані структуру зернистого перліту певного балу, рівномірно розподіленого в матриці. Така структура, стосовно зазначених сталей, порівняно зі структурою пластинчатого перліту, володіє кращою технологічністю і економічністю під час подальших необхідних обробок металу [2]. Для отримання структури зернистого перліту сортовий металопрокат (катанку) призначений для ХОШ піддають сфероїдизуючому відпалу. Традиційні способи сфероїдизації карбідної фази потребують тривалого часу для реалізації процесу термічної обробки (ТО), характеризуються високими енергетичними витратами та мають ряд інших недоліків [3].

Для скорочення тривалості процесу сфероїдизації застосовуються різноманітні схеми передобробок металопрокату, різні способи та технології комбінаційних обробок гарячекатаного прокату для ХОШ [4]. Вказані передобробки зазвичай ґрунтуються на збільшенні дисперсності

частинок карбідів і дефектності кристалічної решітки матриці шляхом зниження температури розпаду аустеніту в області евтектоїдного (перлітного) перетворення. Схема режиму сфероїдируючого відпалу при цьому принципово не змінюється: відбувається нагрівання з частковою фазовою перекристалізацією і здійснюється сфероїдизація карбідів нижче температури A_{c1} . Тобто сфероїдизація безпосередньо здійснюється у процесі ізотермічної витримки, або у процесі безперервного повільного охолодження, або у процесі охолодження, переривчастого декількома ізотермічними витримками.

Значне скорочення тривалості сфероїдируючого відпалування досягається завдяки застосовуванню електротермічної обробки заготовки [5]. Відмінною особливістю вказаної обробки є високі швидкості нагрівання металу, що забезпечуються завдяки використанню висококонцентрованих джерел (електроконтактне або індукційне нагрівання). Однак, треба розуміти, що електротермічна обробка заготовки прискорює процес нагрівання металу до певних необхідних температур (за рахунок чого зменшується загальна тривалість сфероїдируючого відпалування), але при цьому може використовуватися і для створення таких температурних режимів, за допомогою яких забезпечуються умови проведення безпосередньо сфероїдизації цементиту сталейних заготовок. І це, на наш погляд, є новим напрямом розвитку, зокрема, інтенсифікації процесу сфероїдизації цементиту низьковуглецевих сталей, а загалом, в питаннях удосконалення наявних й створення нових технологічних процесів ТО металу.

Знання закономірностей формування структури та необхідного рівня механічних властивостей при швидкісних нагріванні та охолодженні боровмісних сталей дають змогу виконати підготовку структурного стану сталі заготовки перед відпалуванням, який буде враховувати особливості сфероїдизації цементиту у низьковуглецевих сталях, а також вимоги до структури цих

сталей після відпалу за розподілом глобул цементиту у феритній матриці. Таким чином проведення досліджень закономірностей впливу швидкісних режимів температури – деформаційної обробки і подальшого регламентованого охолодження сортового прокату з боровмісних сталей для ХОШ на структурні та фазові перетворення в сталях наразі є актуальною проблемою.

Методика. При вивченні закономірностей структуроутворення використовували диференційно-термічний метод з подальшим дослідженням мікроструктури та твердості зразків сталі.

Основні результати досліджень

Для обґрунтованого підходу до розроблення режимів і технології ТО каліброваної сталі для холодного висаджування досліджували критичні точки та кінетику перетворень переохолодженого аустеніту сталі 20Г2Р, наступного хімічного складу: С – 0,2 %; Si – 0,26 %; Mn – 1,2 %; S – 0,011 %; P – 0,026 %; Cr – 0,20 %; Ti – 0,04 %; B – 0,003 %.

При проведенні досліджень використовували високошвидкісне електротермічне нагрівання зразків на лабораторній установці, яка обладнана пристроями водоповітряного охолодження та системою контролю, реєстрації і регулювання процесу нагрівання та охолодження.

Дослідження особливостей структуроутворення виконані із застосуванням диференційально-термічного методу аналізу [6], який дозволяє провести реєстрацію перетворень у металі й встановлення відповідних до них температур (або інтервалів температур) перебудови кристалічної решітки.

Дослідження мікроструктури металу проводили за допомогою мікроскопа «Neophot-21». Шліфи виготовляли за стандартною методикою, застосовування збільшення при світловій мікроскопії $\times 50$, $\times 500$ крат. Вимірювання твердості у лабораторних умовах проводили по шкалі Віккерса пристроєм ТП-7Р1, а механічні властивості визначали при одновісному

розтягуванні за стандартною методикою на машині FU-10000 ez.

Проведеними дослідженнями встановлено, що положення критичних точок сталі 20Г2Р вказаного хімічного складу відповідає температурам: $A_{c1} = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$; $A_{c3} = 855\text{ }^{\circ}\text{C}$; $M_n = 385\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для визначення режимів ТО та отримання різних структурних станів сталі перед сфероїдизуючим відпалом були побудовані термокінетичні діаграми розпаду переохолодженого аустеніту сталі 20Г2Р (рис. 1).

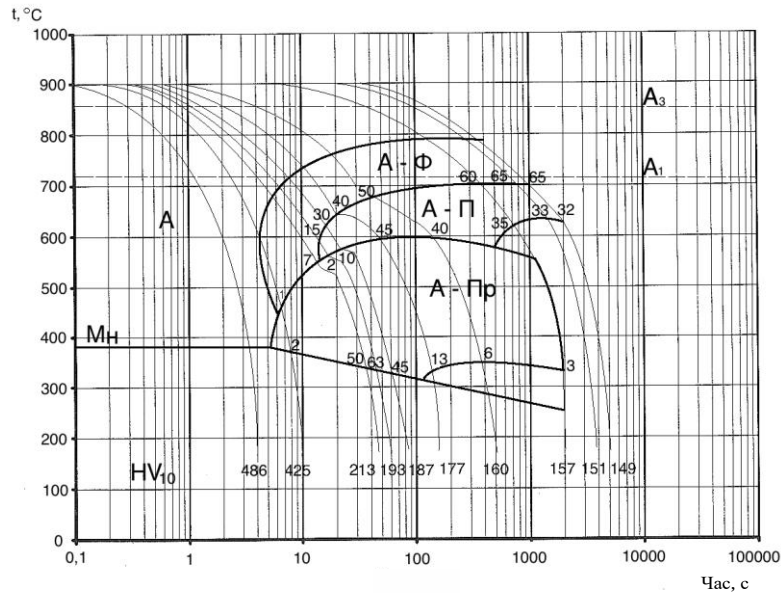


Рис. 1. Термокінетична діаграма перетворення аустеніту боровмісної сталі 20Г2Р

Проведені дослідження і аналіз отриманих даних дозволив побудувати графіки структуроутворення для досліджуваних сталей вказаного хімічного

складу. Кількісний вміст структурних складових, що виникають при охолодженні з різними швидкостями недеформованого аустеніту сталі представлено на рисунку 2.

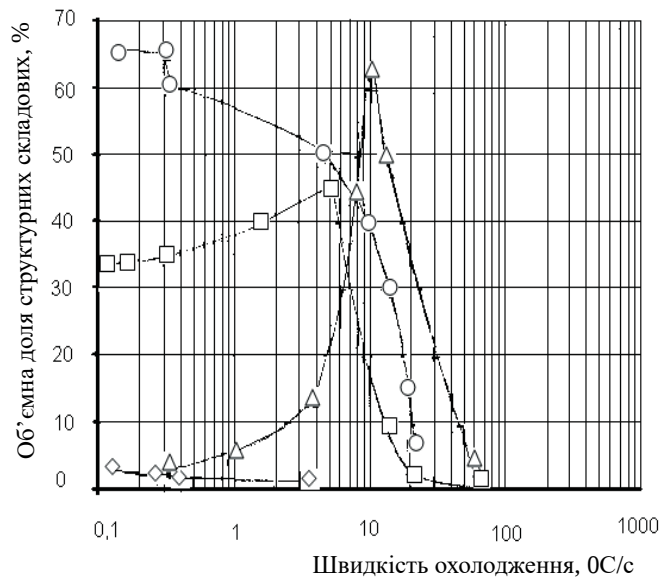


Рис. 2. Вплив швидкості охолодження на характер перетворення аустеніту сталі 20Г2Р:

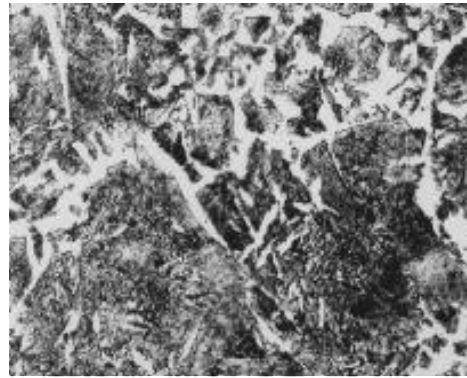
Δ — бейніт; ○ — ферит; □ — перліт

Аналіз диференційних кривих, мікроструктури та властивостей зразків показав (рис. 3, а), що перетворення переохолодженого аустеніту за

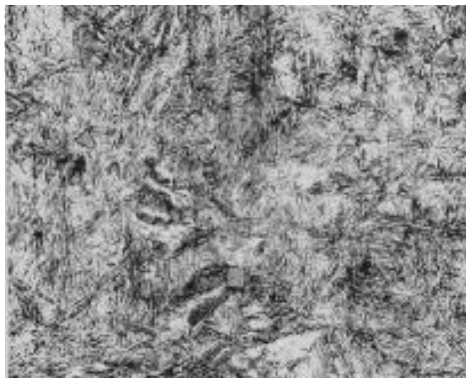


а

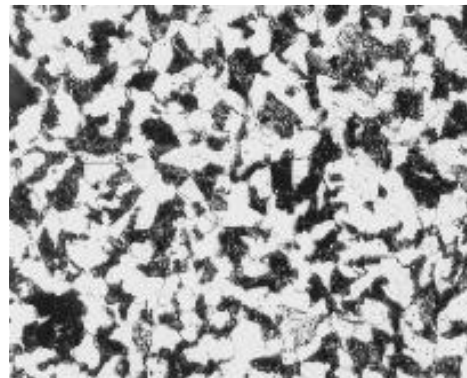
бездифузійним механізмом з утворенням мартенситу відбувається при швидкості охолодження не менш 120 °C/с. Твердість мартенситу при цьому складає HV 486.



б



в



г

Рис. 3. Мікроструктура зразків диференціально-термічного аналізу сталі 20Г2Р:
а – швидкість охолодження $V_{ox} = 120-125 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$; б – швидкість охолодження $V_{ox} = 110-115 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$;
в – швидкість охолодження $V_{ox} = 10-30 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$; г – швидкість охолодження $V_{ox} = 0,1-0,2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$; $\times 500$

При зниженні швидкості охолодження нижче критичної у температурному інтервалі 600...500 °C починаються дифузійні процеси з утворенням структурно-вільного фериту. У температурному інтервалі 550...400 °C дифузійні процеси відбуваються з утворенням структур проміжного типу – бейніту (рис. 3, б). Твердість при цьому зменшується до HV 425.

Зниження швидкості охолодження до 30 °C/с викликає переважне виділення структур проміжного типу: кількість бейніту досягає 50 %. В той же час кількість феритної складової не перевищує 7 %.

Твердість при цьому знижується до HV 213. Максимальна кількість бейніту складає 63...65 % відповідно до середньої швидкості охолодження 15 °C/с. Подальше зниження швидкості охолодження викликає різке зростання кількості феритної складової у структурі зразків.

При охолодженні в інтервалі температур 660...580 °C (відповідно $V_{ox} = 7...12 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$) відбувається утворення на межах феритних зерен структурно-вільного цементиту (рис. 3, в).

Твердість сталі знижується до HV 187. Охолодження з меншими швидкостями призводить до поступового збільшення

об'ємної частки структурно-вільного фериту (приблизно до 65 %), збільшенню на початку процесу структуроутворення до 45 % частки перліту. Далі частка перліту поступово зменшується до 30 %, а на межах зерен відбувається виділення до 3 % структурно-вільного цементиту з поступовим зменшенням у структурі продуктів проміжного перетворення. Їх виділення при охолодженні зі швидкістю менш $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ не спостерігається (рис. 3, з). Мінімальна твердість сталі з ферито-перлітною структурою складає HV 149.

Висновки

Отримано якісну і кількісну картину структуроутворення сталі 20Г2Р. Проведені дослідження критичних точок і кінетики розпаду аустеніту за безперервного охолодження можуть бути використані для розроблення різних режимів ТО з окремого нагріву сталі. У результаті проведених досліджень експериментально підтверджена можливість розробки швидкісних режимів сфероїдируючого відпалу низьковуглецевих сталей з отриманням рівномірного розподілу глобул цементиту у феритній матриці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Парусов В. В., Парусов О. В., Сичков А. Б. Прокат з боровмісних сталей для високоміцних кріпильних виробів : монографія. Дніпро : Арт-прес, 2010. 160 с.
2. Долженков І. Е. Вплив пластичної деформації та інших предобробок на сфероїдизацію карбидів в сталях. *Теорія і практика металургії*. 2007. № 1 (56). С. 66–68.
3. Іващенко В. П., Швачич Г. Г., Соболенко М. О. Новітні металургійні технології на основі використання продуктивних багатопроцесорних обчислювальних комплексів. *Теорія і практика металургії*. 2013. № 3–4 (92–93). С. 78–87.
4. Долженков І. Е. Стан та перспективи термічних та деформаційно-термічної обробки металопрокату. *Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії*. 1999. Вип. 1. С. 247–256.
5. Колпак В. П., Лещенко А. Н., Полторацький Л. М. Комплексні лінії електротермічної обробки сталюного прокату та дроту. *Обладнання і технології термічної обробки металів і сплавів : зб. доп. 4-го міжнар. конгр.* Харків, 2003. Т. 1. С. 42–44.
6. Клименко О. П., Карнаух А. І., Буря А.І., Ситар В. І. Диференційно-термічний аналіз і технології термічної обробки : монографія. Дніпро : Пороги, 2008. 323 с.

REFERENCES

1. Parusov V.V., Parusov O.V. and Sichkov A.B. *Prokat z borovmisnykh staley dlya vysokomitsnykh kripyl'nykh vyrobiv : monografiya* [Rolling of boron-containing steels for high-strength fasteners : monograph]. Dnipro : Artpress Publ., 2010, 160 p. (in Ukrainian).
2. Dolzhenkov I.E. *Vplyv plastychnoyi deformatsiyi ta inshykh predobrobok na sferoyidyzatsiyu karbydiv v stalyakh* [The impact of plastic deformation and other pre-treatments on the spheroidization of carbides in steels]. *Teoriya i praktyka metalurhiyi* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2007, no. 1 (56), pp. 66–68. (in Ukrainian).
3. Ivashchenko V.P., Shvachych G.G. and Sobolenko M.A. *Novitni metalurhiyni tekhnolohiyi na osnovi vykorystannya produktyvnykh bahatoprotsesornykh obchyslyval'nykh kompleksiv* [Advanced metallurgical technologies based on the use of productive multiprocessor computing complexes]. *Teoriya i praktyka metalurhiyi* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2013, no. 3–4 (92–93), pp. 78–87. (in Ukrainian).
4. Dolzhenkov I.E. *Stan ta perspektyvy termichnokh ta deformatsiyno-termichnoyi obrobky metaloprokatu* [The state and prospects of thermal and thermos-mechanical treatment of metal rolling]. *Naukovi visti. Suchasni problemi metalurhiy* [Scientific News Modern Problems of Metallurgy]. 1999, iss. 1, pp. 247–256. (in Ukrainian).
5. Kolpak V.P., Leshchenko A.N. and Poltoratsky L.M. *Kompleksni liniyi elektrotermichnoyi obrobky stal'noho prokatu ta drotu* [Integrated lines for electrothermal treatment of steel rolling and wire]. *Obladnannya i tekhnolohiyi termichnoyi obrobky metaliv i splaviv : zb. dop. 4-ho mizhnar. konhr.* [Equipment and technologies for thermal treatment of metals and alloys : proceedings of the 4th International Congress]. Kharkiv, 2003, vol. 1, pp. 42–44. (in Ukrainian).
6. Klymenko O.P., Karnaukh A.I., Burya A.I. and Sytar V.I. *Dyferentsiyno-termichnyy analiz i tekhnolohiyi termichnoyi obrobky : monografiya* [Differential thermal analysis and technologies of thermal treatment : monograph]. Dnipro : Porohy Publ., 2008, 323 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 09.10.2024.

УДК 378:37.014.5

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.70.1113

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ

ДАШКОВСЬКА О. В.^{1*}, канд. хім. наук, доц., с. н. с.,
КОЛОМОЄЦЬ Г. А.², канд. пед. наук, ст. досл.
ПОГРЕБНЯК В. П.³, канд. техн. наук, проф., с. н. с.

^{1*} Відділ науково-методичного забезпечення підвищення якості освіти, ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти», вул. Митрополита Василя Липківського, 36, 03035, Київ, Україна, тел. +38 (044) 248-25-13, e-mail: dashkovskaya@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3289-8858

² ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти», вул. Митрополита Василя Липківського, 36, 03035, Київ, Україна, тел. +38 (044) 248-25-13, e-mail: g0978423267@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4315-3977

³ Відділ науково-методичного забезпечення інтеграції в європейський освітній простір, ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти», вул. Митрополита Василя Липківського, 36, 03035, Київ, Україна, тел. +38 (044) 248-25-13, e-mail: v_pogrebnyak@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3315-7122

Анотація. *Актуальність роботи.* Основні загрози та виклики, що постали перед вищою школою у воєнний період, а це загроза життю і здоров'ю учасникам освітнього процесу; руйнування та пошкодження інфраструктури ЗВО; вимушене переміщення закладів; вплив війни на контингент здобувачів вищої освіти та склад науково-педагогічних працівників; забезпечення рівного доступу до вищої освіти; та інші умови, у тому числі обмежене фінансування – безпосередньо чи опосередковано впливають на стан всієї системи вищої освіти. В статті досліджується процес забезпечення стійкості вітчизняної системи вищої освіти через трансформацію її складників; оцінюються прийняті державними органами управління та закладами вищої освіти рішення і реалізовані заходи для забезпечення дієздатності галузі в умовах воєнного стану та відновлення у повоєнний період. **Мета роботи:** вивчити вплив агресії РФ на сферу вищої освіти, проаналізувати прийняті управлінські рішення і реалізовані заходи, оцінити їх ефективність у забезпеченні функціонування Системи в умовах війни і відновлення у повоєнний період. Інформувати освітянську громадськість щодо її модернізації в умовах воєнного стану. **Наукова новизна.** З позицій забезпечення стійкості Системи в умовах війни комплексно досліджені управлінські рішення та реалізовані заходи щодо удосконалення управління галуззю, забезпечення доступу до вищої освіти, оптимізації мережі університетів, осучаснення організації освітнього процесу. Оцінено прогрес у процесі інтеграції вищої освіти України в Європейський простір вищої освіти. **Практична значимість роботи** полягає у: встановленні та оцінці спрямованості та стану імплементації змін і доповнень, внесених до Закону за час його дії; оцінці, з позицій забезпечення стійкості галузі в умовах війни та інтегрування української вищої школи в європейський освітній простір, нових законодавчих і нормативних актів, реалізованих та запланованих заходів, спрямованих на здійснення реформ у сфері вищої освіти; постійному інформаційному супроводі процесу імплементації положень Закону, розвитку Системи в умовах сучасних викликів. **Підсумки дослідження.** Вивчення, аналіз та співставлення прийнятих управлінських рішень і наслідків їх виконання свідчать, що заходи, здійснені органами державного управління, закладами вищої освіти щодо подолання негативних впливів війни на галузь, забезпечують її стійкість та дієздатність у складних умовах воєнної пори: упорядковується мережа ЗВО, успішно формуються та підтримуються необхідні контингенти здобувачів вищої освіти, осучаснюється структура підготовки фахівців, організація та зміст освітнього процесу.

Ключові слова: вища освіта; воєнний стан; збройна агресія; переміщені особи; міждисциплінарні програми; переміщені заклади; освітня траєкторія; система вищої освіти; стійкість

ENSURING THE SUSTAINABILITY OF THE UKRAINIAN HIGHER EDUCATION SYSTEM IN WAR CONDITIONS

DASHKOVSKAYA O.V.^{1*}, Cand. Sc. (Chemistry), Assoc. Prof., Sen. Res.,
KOLOMOETS G.A.², Cand. Sc. (Pedagogy), Sen. Res.,
POGREBNYAK V.P.³, Cand. Sc. (Tech.), Prof., Sen. Res.

^{1*} Department of Scientific and Methodological Support for Improving the Quality of Education, State Scientific University “Institute for Modernization of Education Content”, 36, Mitropolita Vasyl Lipkovsky St., Kyiv, 03035, Ukraine, tel. +38 (044) 248-25-13, e-mail: dashkovskyay@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3289-8858

² State Scientific University “Institute for Modernization of Educational Content”, 36, Mitropolita Vasyl Lipkovsky St., Kyiv, 03035, Ukraine, tel. +38 (044) 248-25-13, e-mail: g0978423267@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4315-3977

³ Department of Scientific and Methodological Support for Integration into the European Educational Space, State Scientific University “Institute for Modernization of Education Content”, 36, Mitropolita Vasyl Lipkovsky St., Kyiv, 03035, Ukraine, tel. +38 (044) 248-25-13, e-mail: v_pogrebnyak@ukr.net, ORCID ID: 0000-0 002-3315-7122

Abstract. The relevance of the work. The main threats and challenges facing higher education during the war period, namely, a threat to life and health of participants in the educational process; destruction and damage to the infrastructure of higher education institutions; forced relocation of institutions; the impact of war on the contingent of applicants for higher education and the composition of scientific and pedagogical workers; ensuring equal access to higher education; and other conditions, including limited funding – directly or indirectly affect the state of the entire higher education system. The article examines the process of ensuring the sustainability of the domestic higher education system through the transformation of its components; the decisions made by state governing bodies and higher education institutions and the measures implemented to ensure the viability of the industry in the conditions of martial law and reconstruction in the post-war period are assessed. **Purpose.** To study the impact of the Russian aggression on the sphere of higher education, to analyze the adopted management decisions and the implemented measures, to evaluate their effectiveness in ensuring the functioning of the System in the conditions of war and reconstruction in the post-war period. To inform the educational environment about its modernization in the conditions of martial law. **Scientific novelty.** From the standpoint of ensuring the sustainability of the system in wartime, management decisions are comprehensively studied and measures are implemented to improve industry management, ensure access to higher education, optimize the university network, and modernize the organization of the educational process. The progress in the process of integrating higher education in Ukraine into the European Higher Education Area is assessed. **The practical significance of the work** consists in: establishing and assessing the focus and state of implementation of amendments and additions made to the Law during its validity; assessment from the standpoint of ensuring the sustainability of the industry in the conditions of war and the integration of Ukrainian higher education into the European educational space, new legislative and regulatory acts, implemented and planned measures aimed at implementing reforms in the field of higher education; constant information support for the process of implementing the provisions of the Law, the development of the System in the context of modern challenges. **Results of the research.** The study, analysis and comparison of the adopted management decisions and the consequences of their implementation indicate that the measures taken by government bodies and higher education institutions to overcome the negative impact of the war on the industry ensure its sustainability and efficiency in difficult wartime conditions: the network of higher education institutions is streamlined, the necessary contingents of applicants for higher education are successfully formed and supported, the structure of specialist training, organization and content of the educational process are modernized.

Keywords: *higher education; martial law; armed aggression; displaced persons; interdisciplinary educational programs; displaced institutions; educational trajectory; higher education system; sustainability*

Постановка проблеми. В умовах війни перед вітчизняною вищою освітою постала низка непростих викликів, обумовлених, з одного боку, необхідністю надання якісної освіти в умовах загроз життю та здоров'ю людей, руйнувань та тимчасового переміщення закладів вищої освіти і вимушеної міграції населення, а з іншого, згідно з положеннями Стратегії розвитку вищої освіти в Україні на 2022–2032 роки – забезпечення її інтеграції в європейський освітній простір. Це зумовило трансформацію системи вищої освіти, що у свою чергу, актуалізувало прийняття органами державного управління, закладами вищої освіти ефективних рішень,

спрямованих на мінімізацію втрат, подолання кризових процесів у галузі.

В публікації аналізуються проблеми, з якими зіштовхнулась українська вища школа через військову агресію, оцінюється їх вплив на основні складники системи вищої освіти, досліджуються прийняті управлінські рішення, реалізовані заходи та пропозиції, спрямовані на забезпечення стійкості галузі у воєнний час, інтеграцію в європейський простір вищої освіти, відродження та інноваційний розвиток в повоєнний період.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Серед сучасних оригінальних публікацій, в яких розглядаються проблеми функціонування української вищої школи в

складних умовах, спричинених агресією РФ, слід зазначити:

- науково-аналітичну доповідь Національної академії педагогічних наук «Вища освіта України в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення: виклики і відповіді» (за загальною редакцією В.Г. Кременя), в якій означені і проаналізовані основні проблеми, що постали перед вітчизняною вищою школою у воєнний період, та запропоновані загальні рекомендації щодо їх подолання в сучасних умовах та в період повоєнного відродження галузі;

- дослідження науковців Київського університету імені Бориса Грінченка «Вища освіта в Україні: зміни через війну. Аналітичний звіт» (Є. Ніколаєв, Г. Рій, І. Шемелинець), в якому оцінюються рішення органів управління та університетів щодо реагування на загрози та труднощі, з якими стикнулася система вищої освіти України через наслідки пандемії та війну, її сучасний стан, пов'язаний з окупацією окремих територій країни, переміщенням закладів вищої освіти та учасників освітнього процесу. Аналізуються міграційні процеси серед учнівської, студентської молоді і викладачів в межах держави та за кордон та їх вплив на організацію вступної кампанії, формування та збереження контингентів і організацію освітнього процесу;

- публікацію «Освіта і наука України в умовах воєнного стану: інформаційно-аналітичний збірник ДНУ «Інститут освітньої аналітики», в якій міститься інформація про мережу ЗВО та контингенти учасників освітнього процесу станом на 2022 рік, проаналізовані особливості організації освітнього процесу, законодавче унормування діяльності університетів в умовах воєнного стану;

- статтю дослідників Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка «Вища освіта України в умовах воєнного стану: виклики та шляхи подолання» (Л. Оршанський, І. Нищак, Я. Матвісів, М. Юрків), яка ґрунтується на матеріалах публікацій 2022–2023 років,

даних Євростату, Держстату України та Міжнародної організації з міграції і висвітлює стан вищої освіти України в умовах викликів, що постали перед вітчизняною вищою освітою, та окреслює можливі шляхи їх подолання.

Підсумовуючи аналіз зазначених вище останніх наукових доробок, зазначаючи високий рівень і ґрунтовність приведених у них оцінок втрат, негативних проблем та викликів, запропонованих рішень і заходів, зауважимо, що з об'єктивних причин – термінів виконання та оприлюднення досліджень (2022 – початок 2023рр.), в них не розглядались нові управлінські рішення і реалізовані заходи, спрямовані на забезпечення функціонування галузі в умовах воєнного часу та відновлення після війни. З цих же причин не досліджувались пропозиції стосовно модернізації управління галуззю, оптимізації мережі закладів вищої освіти, відсутній аналіз прийнятих заходів щодо формування та збереження контингентів здобувачів вищої освіти, впровадження гнучких, більш демократичних форм організації освітнього процесу.

Мета публікації – з позицій сучасного стану, що склався у вітчизняній вищій школі, євроінтеграційних перспектив, необхідності повоєнної відбудови та оновлення проаналізувати та оцінити управлінські рішення, дії та їх результати щодо забезпечення функціонування галузі в умовах війни, проаналізувати пропозиції стосовно подальшої модернізації системи вищої освіти, спрямованої на оптимізацію управління, осучаснення мережі закладів вищої освіти, розширення академічної автономії і підвищення ефективності їх діяльності.

Виклад основного матеріалу. Трансформаційні процеси в системі вищої освіти: відповіді на виклики війни. За визначенням Національної академії педагогічних наук України основні виклики, що постали перед вищою школою у воєнний період – безпосередньо чи опосередковано впливають на стан всієї системи вищої освіти (далі Система) потребують

невідкладних рішень і прийняття адекватних заходів, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків, забезпечення стійкості галузі у воєнний час та відновлення після війни [1].

Мережа ЗВО. Найбільш відчутно військові дії позначились на трансформації базових, взаємопов'язаних між собою складників Системи – мережі ЗВО та контингентах учасників освітнього процесу. Починаючи з середини 2014 року з тимчасово окупованих областей та з тих, де ведуться активні бойові дії, з прифронтових територій було переміщено 31 ЗВО державної форми власності: з 2014 року по березень 2022 року – 12, з березня по листопад 2022 року – 19, з них 8 – повторно [2; 3]. Розміщуються вони на базі провідних університетів на відносно безпечних територіях, що стимулювало оптимізацію мережі через об'єднання ЗВО. Станом на 2022 рік п'ять університетів та один інститут були реорганізовані та приєднані до 4-х провідних університетів. Російська агресія проти України, що з 24 лютого 2022 року перетворилась у справжню війну, призвела до величезних матеріальних збитків. За інформацією МОН, станом на 01 липня 2023 року повністю зруйновано 4 ЗВО у Донецькій області. На початок 2023 року в Україні функціонувало 332 ЗВО, з них державних 191. За підпорядкуванням: Міністерству освіти і науки – 133, Міністерству охорони здоров'я – 17, Міністерству культури та інформації – 13, Міністерству внутрішніх справ – 9, Міністерству оборони – 7, решті міністерств і державних служб – 12; 25 комунальних та 116 приватних ЗВО [4].

Трансформація мережі ЗВО, яка продовжуватиметься і надалі, має за мету забезпечити упорядкування її структури, оптимізацію кількісних характеристик, підвищення безпеки і ефективності Системи. Про це свідчить ініційоване МОН громадське обговорення проєкту закону про засади модернізації, в результаті прийняття і реалізації якого кількість ЗВО може зменшитись у три рази. Передбачається, що при прийнятті рішення буде враховуватись

кількість населення у місті, де знаходиться ЗВО, та кількість студентів у закладі освіти: у містах з населенням менше 100 тисяч, де є один заклад вищої освіти, що є містоутворюючим, він буде збережений, якщо їх два, вони будуть об'єднані; у містах з населенням від 100 до 350 тисяч може існувати два заклади вищої освіти, що будуть конкурувати між собою; у містах з населення більшим 350 тисяч мережа формуватиметься із трьох типів закладів: навчальні інститути, дослідницькі університети та світоглядні академії. При цьому, державний заклад вищої освіти (окрім містоутворюючого) не може мати менше 5 тисяч студентів денної форми навчання, а загальний контингент – не менше 10 тисяч студентів. Протягом 2024 року планується провести перший етап – первинне об'єднання (укрупнення) через посилення класичних університетів педагогічними, гуманітарними, природничими; політехнічних – технічними та будівельними; технологічних – аграрними, харчовими та ветеринарними [5; 6].

Формування та збереження контингентів. Суттєвим викликом Системі в умовах війни є ускладнення з формуванням та збереженням контингентів, забезпеченням доступу до вищої освіти здобувачам вищої освіти з різних регіонів України та тим, хто перебувають за кордоном, створенням безпечних умов для організації та проведення якісного освітнього процесу.

Понад 8 млн. стали внутрішньо переміщеними особами, більше 6 млн. осіб вимушено покинули територію України. Станом на кінець 2022 року із 4,18 мільйона українських громадян, зареєстрованих у країнах Європи для отримання тимчасового захисту, спричиненого військовими діями, 665 тисяч студентів та учнів шкіл та 25 тисяч освітян. Число випускників шкіл зменшилось з 640 тисяч у 2008 році до 360 тисяч у 2023 році з перспективою зниження до 300 тисяч у 2030 [7].

Слід зазначити, що заходи МОН щодо спрощення порядку вступу до закладів вищої освіти у 2022–2023 роках, створення

умов доступу до вищої освіти для жителів тимчасово окупованих і особливо небезпечних територій та організація тестування за кордоном дали можливість українським ЗВО сформувати необхідні контингенти здобувачів вищої освіти та забезпечити діяльність Системи у нових умовах. Загалом у вступній кампанії 2022 року взяли участь понад 214 тисяч осіб. Завдяки заходам МОН та зусиллям ЗВО ситуацію вдалося стабілізувати: станом на початок 2023 року загальна чисельність здобувачів вищої освіти становила 1 113 тисяч осіб, зокрема у ЗВО, підпорядкованих МОН, 869,4 тисяч осіб. Застосування спрощених процедур вступу до ЗВО у 2023 та наступних роках, заохочення молоді, яка перебуває за кордоном, до навчання у вітчизняних університетах та створення безпечних умов для навчання сприятиме формуванню та збереженню студентських колективів. У 2023 році на перший курс бакалаврату було зараховано 267 тисяч студентів, що на 40 тисяч більше у порівнянні з 2022 роком.

У 2024 році МОН оновило Порядок прийому на навчання для здобуття вищої освіти. Передбачена підтримка ЗВО, розташованих у прифронтових та прикордонних областях, через установлення регіонального коефіцієнту, на який множиться конкурсний бал вступників, які обрали ЗВО, розташовані поблизу зони бойових дій та постраждалих від російської агресії територій. Встановлені спеціальні умови для вступу на магістратуру студентам, які здобули ступінь бакалавра у 2024 році, зареєстровані та проживають на тимчасово окупованій території чи переселилися з таких територій після 1 січня 2024 року. Спрощені умови вступу для здобуття другої вищої освіти ступеня магістра та доктора філософії/доктора мистецтва.

Галузі знань та спеціальності. Важливим кроком Інтеграції вітчизняної вищої освіти в європейську є затвердження нового Переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти (далі

Перелік) [9]. Якщо у попередньому Переліку було 28 галузей і 122 спеціальності, то у новому 11 галузей, десять з яких відповідають Міжнародній стандартній класифікації освіти (далі МСКО), а додаткова одинадцята – «Безпека і оборона» – умовам воєнного стану. Одночасно це рішення реалізує положенню статті 9 Закону щодо розроблення Переліку на основі МСКО. Кількість та назви спеціальностей нового Переліку (пропонується біля 90), їх відповідність Переліку 2015 року передбачається винести на громадське обговорення. Слід зазначити, що впровадження нового Переліку також сприятиме запланованому МОН на 2025 рік перегляду стандартів вищої освіти та переходу на оновлені освітні програми.

Освітні програми і стандарти. Прийнятий у квітні 2024 року Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку індивідуальних освітніх траєкторій та вдосконалення освітнього процесу у вищій освіті» [10], який є важливою складовою комплексної трансформації системи вищої освіти, суттєво розширює автономію ЗВО в розробленні та реалізації освітніх програм та можливості здобувачів вищої освіти у формуванні індивідуальних освітніх траєкторій. Внесені зміни до низки статей Закону, які регулюють питання освітніх програм, стандартів вищої освіти та організації освітнього процесу. Запроваджується модель «вступу на галузь» через міждисциплінарну освітню програму, яка передбачає вибір студентом конкретної спеціальності після одного або півтора років навчання в університеті, відповідно до запиту роботодавця. Особи, які здобули вищу освіту за міждисциплінарною освітньою програмою, користуються правами, передбаченими для осіб, які здобули освіту такого самого рівня за галузями та спеціальностями, що утворюють міждисциплінарну предметну область. Студенти зможуть навчатись одночасно за декількома освітніми програмами, у кількох ЗВО за умови здобуття лише однієї кваліфікації за кожним

рівнем вищої освіти за кошти державного бюджету, а студенти-контрактники – самостійно визначати тривалість навчання в університеті: закінчити 4-річну бакалаврську програму за три роки або освоїти 240 необхідних програмних кредитів ЄКТС за 6–8 років, поєднуючи навчання з роботою.

Розширено та доповнено частини 4, 5, 6 і фактично по новому сформульована частина 3 статті 10 «Стандарти вищої освіти», яка визначає такі вимоги до освітньої програми: обсяг кредитів ЄКТС, необхідний для здобуття відповідного ступеня вищої освіти за відповідною спеціальністю (для третього рівня вищої освіти – обсяг освітньої складової освітньо-наукової/освітньо-творчої програми); мінімальний обсяг практичної підготовки для освітньо-професійних програм; опис предметної області, що містить: інформацію про об'єкт (об'єкти) вивчення та/або діяльності; теоретичний зміст; методи, методики та технології, необхідні для практичного використання; інструменти та обладнання, які випускник повинен вміти використовувати у своїй професійній діяльності; вимоги до освіти осіб, які можуть розпочати навчання за цією програмою; перелік обов'язкових компетентностей випускника; форму (форми) атестації здобувачів вищої освіти; додаткові вимоги та обмеження (за наявності) для міждисциплінарних освітніх програм; вимоги законодавства та/або професійних стандартів, необхідні для здобуття відповідних професійних

Воєнна ситуація в країні суттєво вплинула на практику акредитації освітніх програм і терміни дії акредитаційних документів. Національному агентству із забезпечення якості вищої освіти (НАЗЯВО) уряд дозволив тимчасово проводити акредитацію освітніх програм у віддаленому (дистанційному) режимі, а також ухвалювати рішення про умовну (відкладену) акредитацію без проведення або з частковим проведенням акредитаційної експертизи без оплати ЗВО вартості акредитації. Продовжено термін дії

сертифікатів ЗВО (наукових установ) про акредитацію спеціальностей та сертифікатів про акредитацію освітніх програм, що були чинними на 24 лютого 2022 року. Зазначені рішення НАЗЯВО може ухвалювати лише при наявності обґрунтування закладом вищої освіти неможливості проведення акредитації освітньої програми в загальному порядку через ушкодження внаслідок бойових дій [11].

Управління у сфері вищої освіти. Обговорюються пропозиції щодо скорочення кількості структур, які здійснюють управління галуззю вищої освіти, через вилучення з їх переліку Національної академії наук України, галузевих академій наук та обмеження кількості галузевих органів управління. Пропонується залишити лише ті, до сфери управління яких належать військові навчальні заклади, військові навчальні підрозділи та ЗВО із специфічними умовами навчання. При цьому, враховуючи суспільну дискусію із зазначених питань, необхідно більш публічно готувати пропозиції щодо модернізації мережі ЗВО та оптимізації управління галуззю, уникаючи поспішних, іноді не до кінця обґрунтованих рішень.

Висновки

1. Рішення і заходи, здійснені органами державного управління, закладами вищої освіти щодо мінімізації та подолання негативних наслідків військових дій та тимчасової окупації окремих територій держави, зберегли стійкість Системи в умовах воєнного стану.

2. Модернізація мережі ЗВО, яка продовжуватиметься, спрямована на упорядкування її структури, оптимізацію кількісних характеристик відповідно до нових умов, забезпечення дієздатності галузі та безпеки учасників освітнього процесу.

3. Постійна увага МОН до питань організації вступних кампаній у ЗВО, оновлення порядку прийому на навчання для здобуття вищої освіти, підтримка навчальних закладів, розташованих у прифронтових та прикордонних областях,

проведення вступних випробувань для абітурієнтів, які тимчасово перебувають за кордоном, дозволяють успішно формувати та зберігати контингенти студентів у важкі часи повномасштабної агресії рф.

4. Оптимізація управління галуззю, осучаснення структури мережі закладів

вищої освіти, розширення їх академічної автономії і підвищення ефективності відповідають сучасним умовам, євроінтеграційним перспективам вітчизняної вищої школи, сприятимуть її відбудові, оновленню та інноваційному розвитку в повоєнний період.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кремень В. Г., Луговий В. І., Саух П. Ю., Драч І. І., Слюсаренко О. М., Скиба Ю. А. та ін. Вища освіта України в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення: виклики і відповіді : науково-аналітична доповідь. За заг. ред. В. Г. Кременя. Київ : Педагогічна думка, 2023. 172 с. URL: <https://ihed.org.ua/publications/vyshha-osvita-ukrayiny-v-umovah-voyennogo-stanu-ta-pislyavoyennogo-vidnovlennya-vyklyky->
2. Ніколаєв Є., Рій Г., Шемелинець І. Вища освіта в Україні : зміни через війну : аналітичний звіт. Київ : Київський університет імені Бориса Грінченка, 2023. 94 с. URL: <https://osvitanalityka.kubg.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/HigherEd-in-Times-of-War.pdf>
3. Освіта і наука України в умовах воєнного стану: інформаційно-аналітичний збірник. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/serpneva-konferencia/2023/22.08.2023/Inform-analytic.zbirn-Osvita.v.umovah.voyennogo-stanu-vykl.rozv.povoyen.perspekt.22.08.2023.pdf>
4. Оршанський Л., Нишак І., Матвісів Я., Юрків М. Вища освіта України в умовах воєнного стану : виклики та шляхи подолання. *Молодь і ринок*. 2024. № 1 (221). URL: <http://mir.dspu.edu.ua/article/view/298622>
5. Про внесення змін до деяких законів України (щодо створення передумов для модернізації мережі закладів вищої освіти) : проект Закону України. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/mon-proponuye-do-gromadskogo-obgovorennya-proyekt-zakonu-ukrayini-pro-vnesennya-zmin-d>
6. МОН оприлюднило орієнтовні критерії модернізації мережі. URL: https://osvita.ua/vnz/reform/91422/#google_vignette5
7. Не вистачає студентів : у Міносвіти хочуть зменшити кількість університетів втричі. URL: https://mbiz.censor.net/news/3467716/ne_vystachaye_studentiv_u_minosvity_hochut_zmenshyty_kilkist_universytetiv_vtrychi
8. Міністерство освіти і науки України оновило Порядок прийому на навчання для здобуття ступенів бакалавра, магістра, доктора філософії/доктора мистецтва у 2024 році. URL: <https://mon.gov.ua/news/zminy-do-poriadku-priyomu-na-navchannia-dlia-zdobuttia-vyshchoi-osvity-u-2024-rots>
9. Про внесення змін до переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти : постанова КМУ УКРАЇНИ від 30 серпня 2024 р. № 1021. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-vnesennia-zmin-do-pereliku-haluzei-znan-i-spetsialnostei-za-iakym-a1021>
10. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку індивідуальних освітніх траєкторій та вдосконалення освітнього процесу у вищій освіті : Закон України. URL: https://kno.rada.gov.ua/news/main_news/76539.html
11. Про особливості акредитації освітніх програм, за якими здійснюють підготовку здобувачі вищої освіти, в умовах воєнного стану : постанова Кабінету Міністрів України від 16 березня 2022 р. № 295. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/295-2022-%D0%BF#Text>

REFERENCES

1. Kremen V.G., Lugovoi V.I., Saukh P.Yu., Drach I.I., Slysarenko O.M., Skyba Yu.A. and oth. *Vyshcha osvita Ukrayiny v umovakh voyennoho stanu ta pislyavoyennoho vidnovlennya : vyklyky i vidpovidi: naukovo-analitychna dopovid* [Higher education of Ukraine in the conditions of martial law and post-war reconstruction : challenges and answers: scientific and analytical report]. In general ed. V.G. Kremen. Kyiv : Pedahohichna Dumka Publ., 2023, 172 p. URL: <https://ihed.org.ua/publications/vyshha-osvita-ukrayiny-v-umovah-voyennogo-stanu-ta-pislyavoyennogo-vidnovlennya-vyklyky-> (in Ukrainian).
2. Nikolaev E., Riy H. and Shemelynets I. *Vyshcha osvita v Ukrayini : zminy cherez viynu : analitychnyy zvit* [Higher education in Ukraine : changes due to the war : an analytical report]. Kyiv : Kyivskyi Universytet imeni Borysa Hrinchenka, 2023, 94 p. URL: <https://osvitanalityka.kubg.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/HigherEd-in-Times-of-War.pdf> (in Ukrainian).
3. *Osvita i nauka Ukrayiny v umovakh voyennoho stanu : informatsiyno-analitychnyy zbirnyk* [Education and science of Ukraine under martial law : an informational and analytical collection]. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/serpneva-konferencia/2023/22.08.2023/Inform-analytic.zbirn-Osvita.v.umovah.voyennogo-stanu-vykl.rozv.povoyen.perspekt.22.08.2023.pdf> (in Ukrainian).

4. Orshanskyi L., Nyshchak I., Matvisiv Ya. and Yurkiv M. *Vyshcha osvita osvita Ukrainy v umovakh voyennoho stanu: vyklyky ta shlyakhy podolannya* [Higher education of Ukraine under martial law : challenges and ways to overcome them]. *Molod i rynok* [Youth and Market]. 2024, no. 1 (221). URL: <http://mir.dspu.edu.ua/article/view/298622> (in Ukrainian).

5. *Pro vnesennya zmin do deyakykh zakoniv Ukrainy (shchodo stvorenniya peredumov dlya modernizatsiyi merezhi zakladiv vyshchoyi osvity) : proyekt Zakonu Ukrainy* [On the introduction of changes to some laws of Ukraine (regarding the creation of prerequisites for the modernization of the network of higher education institutions : draft Law of Ukraine)]. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/mon-proponuye-do-gromadskogo-obgovorenniya-proyekt-zakonu-ukrayini-pro-vnesennya-zmin-d> (in Ukrainian).

6. *MON oprylyudnylo oriyentovni kryteriyi modernizatsiyi merezhi* [The Ministry of Education and Culture has published indicative criteria for the modernization of the network]. URL: https://osvita.ua/vnz/reform/91422/#google_vignette5 (in Ukrainian).

7. *Ne vystachaye studentiv : u Minosvity khochut zmenshyty kilkist universytetiv vtrychi* [Not enough students : the Ministry of Education wants to reduce the number of universities by three times]. URL: https://mbiz.censor.net/news/3467716/ne_vystachaye_studentiv_u_minosvity_hochut_zmenshyty_kilkist_universytetiv_vtrychi (in Ukrainian).

8. *Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy onovylo Poryadok pryymu na navchannya dlya zdobuttya stupeniv bakalavra, mahistra, doktora filosofiyi/doktora mystetstva u 2024 rotsi* [The Ministry of Education and Science of Ukraine has updated the Admission Procedure for Bachelor's, Master's, Doctor of Philosophy/Doctor of Arts degrees in 2024]. URL: <https://mon.gov.ua/news/zminy-do-poriadku-pryiomu-na-navchannia-dlia-zdobuttia-vyshchoi-osvity-u-2024-rotsi> (in Ukrainian).

9. *Pro vnesennya zmin do pereliku haluzey znan' i spetsial'nostey, za yakymy zdiysnyuyet'sya pidhotovka zdobuvachiv vyshchoyi ta fakhovoyi peredvyshchoyi osvity : postanova KMU UKRAYiNY vid 30 serpnia 2024 r. № 1021* [On making changes to the list of fields of knowledge and specialties for which higher and professional pre-higher education applicants are trained : resolution of the CMU of Ukraine dated August 30, 2024, no. 1021]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-vnesennia-zmin-do-pereliku-haluziei-znan-i-spetsialnostei-za-iakym-a1021> (in Ukrainian).

10. *Pro vnesennya zmin do deyakykh zakoniv Ukrainy shchodo rozvytku indyvidualnykh osvitnikh trayektoriy ta vdoskonalennya osvitnoho protsesu u vyshchiiy osvit : Zakon Ukrainy* [On making changes to some laws of Ukraine regarding the development of individual educational trajectories and improvement of the educational process in higher education : Law of Ukraine]. URL: https://kno.rada.gov.ua/news/main_news/76539.html (in Ukrainian).

11. *Pro osoblyvosti akredytatsiyi osvitnikh prohram, za yakymy zdiysnyuyut pidhotovku zdobuvachi vyshchoyi osvity, v umovakh voyennoho stanu : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 16 bereznia 2022 r. № 295* [About the peculiarities of the accreditation of educational programs, according to which students of higher education are trained, in the conditions of martial law : resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated March 16, 2022, no. 295]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/295-2022-%D0%BF#Text> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.10.2024.

УДК 691

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.78.1114

РОЗРОБКА РОЗЧИНІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ГРИШКО Г. М.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ВАТАЖИШИН О. В.³, *асп.*,
ДРОЗД А. А.⁴, *канд. техн. наук*,
ДИМКІВСЬКА А. Д.⁵, *студ.*

¹ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: viktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: vatazhichin.oleksandr@pdaba.edu.ua

⁴ ТОВ «Тадалс-буд», пров. Біологічний, 2, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 631-92-92, e-mail: Li2kondik@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7588-5569

⁵ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: masolpochta@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-6611-8743

Анотація. Постановка проблеми. Світ розвивається, що несе за собою зміни. Змін зазнають і будівельні технології та матеріали. Для найшвидшого відновлення інфраструктури та ліквідації наслідків війни потрібно застосовувати сучасні та ефективні методи будівництва. У будівництві нових споруд уже зараз можна впроваджувати технології, які працюють на скорочення часу будівництва, збільшення терміну служби будівельних структур, зменшення витрат на працю й ресурси та досягнення економічних переваг. Через те, що 3D-друк у будівництві – досі нова технологія та не має чітких нормативних вимог, розроблення складу сумішей стає важливим аспектом у світі будівельних матеріалів. **Мета дослідження** – розкрити інноваційну технологію 3D-друку в будівництві, показати її переваги та недоліки в експлуатації. Розробити розчини для 3D-друку на основі системи в'язучих речовин $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Показати вплив добавок на фізико-механічні властивості розчинів. **Висновки.** Проаналізовано технологію 3D-друку в будівництві, показано її переваги та недоліки. Виконано експериментальні лабораторні дослідження для розроблення в'язучих композитів для розчинів 3D-друку. Результати досліджень показують значне скорочення часу тужавлення композиту та збільшення його міцнісних здатностей на ранньому проектному віці завдяки використанню добавок. Прискорювач Мареї Мареquick AFK 777 пришвидшив кінець тужавлення з доби до 6 хвилин, тобто у 240 разів, а наявність нанодобавки, а саме тауриту, збільшила міцність в'язучого на стиск учетверо. Суперпластифікатор Sika ViscoCrete G2 підтримував необхідну текучість в'язучого, не збільшуючи водотвердне відношення у разі додавання інших добавок.

Ключові слова: 3D-будівництво; 3D-друк; роботизовані системи; інновації будівельної галузі; розчини; міцність; випробування; добавки; терміни тужавлення

DEVELOPMENT OF SOLUTIONS FOR 3D-PRINTING BASED ON THE SYSTEM OF BINDING SUBSTANCES $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$

DEREVIANKO V.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
HRYSHKO H.M.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assos. Prof.*,
VATAZHYSYHN O.V.³, *Postgrad. Stud.*,
DROZD A.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.)*,
DYMKIVSKA A.D.⁵, *Stud.*

¹ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: vyktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: vatazhichin.oleksandr@pdaba.edu.ua

⁴ Limited Liability Company "Tadals-bud", 2, Biological Alley, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 631-92-92, e-mail: Li2kondik@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7588-5569

⁵ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: masolpochta@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-6611-8743

Abstract. Problem statement. The world is developing, which brings changes. Construction technologies and materials are also undergoing changes. Modern and efficient construction methods must be used to restore the infrastructure as soon as possible and eliminate the consequences of the war. In the construction of new structures, technologies can already be implemented that work to reduce construction time, increase the service life of building structures, reduce labor and resource costs, and achieve economic benefits. Due to the fact that 3D printing in construction is still a new technology and does not have clear regulatory requirements, the development of the composition of mixtures is an important aspect in the world of building materials. **Purpose of the study** is to reveal the innovative technology of 3D printing in construction, to provide its advantages and disadvantages in operation. Develop solutions for 3D printing based on the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ binder system. Show the effect of additives on the physical and mechanical properties of solutions. **Conclusion.** 3D printing technology in construction was analyzed, its advantages and disadvantages were provided. Experimental laboratory studies were carried out for the development of binder composites for 3D printing solutions. Research results show a significant reduction in the hardening time of the composite and an increase in its strength capabilities at an early design age due to the use of additives. Accelerator Mapei Mapequick AFK 777 accelerated the end of hardening from 1 day to 6 minutes, i.e. 240 times, and the presence of nanopowder, namely taurite, increased the compressive strength of the binder by 4 times. Sika ViscoCrete G2 superplasticizer maintained the necessary fluidity of the binder without increasing the water-hardening ratio when other additives were added.

Keywords: 3D construction; 3D printing; robotic systems; innovations in the construction industry; solutions; strength; trial; supplements; long-term terms

Постановка проблеми. Сучасне будівництво завжди шукає нові технології для оптимізації процесу та зниження витрат. Одне з таких нововведень – створення будівельних елементів із використанням 3D-принтерів. Саме технологія 3D-друку стала вирішенням таких недоліків як довготривале будівництво, великі витрати на працю та ресурси та підвищена небезпека для навколишнього середовища.

Незважаючи на невелику кількість випущених у 2023 році нових продуктів, низьку економічну динаміку, що впливає на витрати, очікується, що ринок адитивного виробництва у 2024 році зросте приблизно на 20 % [8].

Ключовим аспектом успішної реалізації 3D-друку у будівництві бачиться розроблення спеціалізованих розчинів, які здатні забезпечити необхідні властивості матеріалів для 3D-друку в будівництві.

Тому дослідження, направлені на розроблення розчинів для 3D-друку на основі системи в'язучих речовин $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$, досить актуальні.

Аналіз публікацій. Вивченням та дослідженням адитивних технологій в будівництві займаються вчені всього світу такі як О. В. Андрійчук, Г. О. Андрощук, О. В. Струтинська, Л. Й. Дворкін, Р. Бусвел. Незважаючи на великий внесок цих авторів, технологічні та нормативні питання впровадження адитивних технологій у будівництво України все ще потребують подальшого наукового розроблення.

У праці [9] вказано, що потенційна цінність підходів швидкого виробництва зростає зі збільшенням складності проблеми. Якщо розглядати системи, зібрані з багатьох компонентів, ця складність максимізується, коли система виготовляється за допомогою єдиного процесу.

На рівні компонентів швидке прототипування може вплинути вже сьогодні. Зі збільшенням масштабу зростає і кількість традиційних матеріалів і методів, які потрібно замінити. Технічні проблеми зростають, але вирішення загальних проблем, таких як інтерфейси і з'єднання, стають концептуально більш здійсненними [9].

Одна з ключових інноваційних технологій – це 3D-друк бетону, який ще називають адитивним виробництвом. Цей процес включає в себе створення 3D-елементів будівель безпосередньо на будівельному майданчику за допомогою комп'ютеризованої цифрової моделі.

Адитивне виробництво значно сприяє поліпшенню екологічної безпеки завдяки зменшенню кількості відходів та споживання енергії. Більше того, 3D-друк стає економічно вигідним виробництвом, адже цей метод значно зменшує трудомісткість, кількість необхідних ресурсів та час виконання будівельних робіт [10].

Інноваційна технологія 3D-друку набирає популярності у будівництві завдяки своїй ефективності. Існує три основні методи 3D-друку:

- спікання (селективне спікання);
- напилення (компонентної склеювання, стереолітографія);
- пошарове екструдкування в'язкої робочої суміші [11].

Робочий принцип будівельного принтера базується на використанні екструдера, який наносить спеціальну швидкоотужавну бетонну суміш із додаванням різних компонентів. Завдяки точному нанесенню шарів один на одного можна легко зводити не лише стіни, а й різноманітні конструкції. Ці шари міцно з'єднуються та ущільнюються, забезпечуючи не лише стійкість до власної ваги, а й опір вазі всієї будівлі. В разі потреби можна використовувати горизонтальне або вертикальне армування.

Залежно від характеристик конкретного принтера, висота та габарити будівлі змінюватимуться. За просторовим способом роботи будівельні 3D-принтери поділяються

на порталні принтери, дельта-принтери та роботизовані маніпулятори.

Завдяки 3D-друку можна економити на матеріалах, трудовитратах та енергії. Це робить виробництво більш ефективним та доступним, а також сприяє зниженню кінцевої ціни продукції.

Використання передових технологій, таких як 3D-друк, гарантує високу якість та точність у виготовленні будівельних компонентів. Це сприяє стабільності та надійності будівельних структур, підвищує рівень енергоефективності та раціонального використання ресурсів. Такі технології дозволяють створювати більш ефективні системи утеплення, вентиляції та освітлення, що сприяє збереженню енергії та зменшенню екологічного впливу будівлі на навколишнє середовище [3].

Разом із незаперечними перевагами 3D-друку існує і низка проблем у використанні цієї методики, а саме:

- відсутність нормативної законодавчої бази будівництва за допомогою 3D-друку;
- габаритні розміри будівель і споруд, що будуються, обмежені можливістю 3D-принтерів;
- висока трудомісткість устаткування [3].

Якісний 3D-друк будівель потребує використання матеріалів із чітко визначеними властивостями.

Для якісного формування бетону та його подальшої міцності необхідно підтримувати певну консистенцію, що залежить від вмісту води. Суміш бетону повинна мати достатню структурну міцність, щоб зберігати форму та нести навантаження від наступних шарів конструкції. Це досягається за рахунок чітко визначеного співвідношення води та цементу. Важливо, щоб бетонна суміш зберігала клейкість для міцного з'єднання з наступним шаром, запобігаючи утворенню окремих конгломератів, що гарантує монолітність та стійкість конструкції.

Для транспортування та формування бетону необхідна його рухомість. Це досягається за допомогою добавок, які не впливають на міцність, але поліпшують текучість.

Для досягнення необхідної якості найважливішими властивостями суміші вважаються:

- формовність (екструзійність),
- рухомість,
- структурна міцність (міцність екструдованого шару після укладки),
- термін придатності (строки тужавлення),
- міцність на стиск,
- міцність зчеплення між шарами.

Швидкотвердні бетонні суміші з модифікувальними добавками – це наразі найпопулярніший, найпоширеніший та найперспективніший матеріал для будівельного 3D-друку.

У статті [5] розроблено розчин на основі портландцементу I типу М500 та доменного гранульованого шлаку, міцність якого у віці 3 діб досягала максимум 17,8 МПа. Можна зробити висновок, що велика кількість використаної води значно зменшила міцність суміші.

Мета дослідження – розробити склад розчинів для 3D-друку на основі системи в'язучих речовин $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ та визначити вплив добавок на їх фізико-механічні властивості.

Результати досліджень

Розроблення в'язучого для 3D-принтерів проводили, використовуючи:

напівводний гіпс Г-5 $\text{CaSO}_4 \times 0,5\text{H}_2\text{O} + 1,5\text{H}_2\text{O}$ та глиноземистий цемент ГЦ-40 $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ у відсотковому співвідношенні 30:70 [1].

Спочатку дослідили вплив прискорювачів, а саме Coral Master Fix та Marei Marequick AFK 777, на терміни тужавлення в'язучого.

Підтримуючи необхідну рухомість суміші (150...170 мм по віскозиметру Суттарда), визначили необхідне водотвердне відношення та початок і кінець тужавлення. Результати наведені в таблиці 1.

Дослідження показує, що прискорювач тужавлення Marei Marequick AFK 777 має кращі показники, але за його використання значно збільшується необхідна кількість води. Тому вирішили проводити подальші випробування з використанням Marei Marequick AFK 777, додаючи суперпластифікатор, який зменшить водотвердне відношення.

Потім проаналізували вплив прискорювача Marei Marequick AFK 777 на терміни тужавлення в'язучого з використанням суперпластифікатора Sika ViscoCrete G2 та нанодобавки – тауриту при В/Т відношенні 0,42. Результати досліджень наведені в таблиці 2.

Таблиця 1

Вплив прискорювачів на терміни тужавлення

Склад, %		Прискорювач тужавлення, %		В/Т	Терміни тужавлення		Рухомість за Суттардом, мм
ГЦ-40	Напівводний гіпс	Coral Master Fix	Marei Marequick AFK 777		$t_{\text{поч.}}$	$t_{\text{кін.}}$	
70	30	–	–	0,45	1 год. 6 хв.	1 доба	155
70	30	1	–	0,48	12 хв.	28 хв.	180
70	30	–	2	0,52	4 хв.	6 хв.	155

Таблиця 2

Вплив добавок на терміни тужавлення та текучість в'язучого

№ вар.	Склад, %		Добавки, %			Терміни тужавлення		Рухомість за Суттардом, мм
	ГЦ-40	Напівводний гіпс	Прискорювач тужавлення – Marei Marequick AFK 777	Пластифікатор – Sika ViscoCrete G2	Нанодобавка – таурит	$t_{\text{поч.}}$	$t_{\text{кін.}}$	
1	70	30	–	–	–	15 хв. 40 сек.	21 хв.	155
2	70	30	4	0,8	–	6 хв. 20 сек.	7 хв. 30 сек.	155
3	70	30	8	0,8	0,75	3 хв. 32 сек.	9 хв. 29 сек.	175

Таблиця 3

Вплив нанодобавки-тауриту на міцність в'язучого

№ вар.	Склад, %		Добавки, %			R _{ст} , МПа
	ГЦ-40	Напівводний гіпс	Прискорювач тужавлення - Marei Marequick AFK 777	Пластифікатор - Sika ViscoCrete G2	Нанодобавка - таурит	
1	70	30	–	–	–	11,5
2	70	30	4	0,8	–	15
3	70	30	8	0,8	0,75	49,2



Рис. Вплив добавок на міцність в'язучого

Отже, вміст 8 % прискорювача, 0,8 % суперпластифікатора та 0,75 % нанодобавки – оптимальний склад, результати випробування якого відповідають нормативним вимогам. Далі були проведені дослідження міцності на стиск для розроблених складів. Результати досліджень наведені в таблиці 3 та на рисунку.

Дослідження показує, що в'язуче, в складі якого є добавки, має більшу міцність на стиск, ніж чистий склад. Наявність 0,75 % тауриту збільшує міцність учетверо. Зі складом в'язучого: 70 % ГЦ-40, 30 % Г-5, 8 % Marei Marequick AFK 777, 0,8 % Sika ViscoCrete G2 та 0,75 % тауриту розроблено розчин.

Висновки

Проаналізовано технологію адитивного виробництва у будівництві, вказано на його переваги та недоліки. Виконано експериментальні лабораторні дослідження

для розроблення в'язучих композитів для розчинів 3D-друку.

Дослідження вказують на відчутне зменшення часу, необхідного для твердіння композиту, та поліпшення його міцності на ранніх стадіях.

Прискорювач Marei Marequick AFK 777 скоротив час тужавлення з доби до 6 хвилин, зменшивши час настання кінця тужавлення у 240 разів. Суперпластифікатор Sika ViscoCrete G2 зберіг необхідну текучість суміші, при цьому не змінюючи водотвердого співвідношення за додавання інших добавок, тоді як наявність нанодобавки, зокрема тауриту, збільшила міцність в'язучого на стиск учетверо.

Композиційні в'язучі речовини, досліджені вище, можна використовувати для 3D-друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев'янюк В. М., Гришко Г. М., Ватажишин О. В. Модифіковані композиційні цементні системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3 (015). С. 59–65.
2. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Степасюк Ю. О., Марчук В. В. Ефективні будівельні розчини для 3D-принтера. *Будівельні матеріали та вироби*. № 1–2 (101). 2020. С. 16–21.
3. Згалат-Лозинська Л. О., Згалат-Лозинський О. Б. Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D-друку у будівництві. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія : Економіка і управління*. Т. 31 (70), № 5. 2020. С. 45–51 URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7>
4. Комишев Д. Г., Беятинський А. О. Інноваційні технології в будівництві : 3D-друк будівель, мобільні програми та штучний інтелект. *Технічні науки*. 2023. Вип. 4 (104). С. 22–43.

5. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3D-принтеру. *Будівельні матеріали та вироби*. № 1–2 (102). 2021. С. 14–19.
6. Андрійчук О. В., Оласюк П. Я. Застосування 3D-технологій у будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. 2015. Вип. 3. С. 11–18.
7. Петришина А. А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього. *Актуальні задачі сучасних технологій : матер. IV Міжнар. наук.-техн. конф. мол. уч. та студ. (25–26 листопада 2015 р.)*. Тернопіль, 2015. С. 26–27.
8. Попадюк С. Адитивне виробництво у 2024 році : тренди та прогнози. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-manufacturing-trends-2024/> (дата звернення : 26.06.2024 р.)
9. Buswell R. A., Soar R. C., Pendlebury M., Gibb A. G., Edum-Fowte F. T., Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction. *Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*. Rotterdam. The Netherlands. 2005. Pp. 141–150. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (дата звернення : 26.06.2024).
10. Hamidreza Gh. S., Corker J., Fan M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 93. Pp. 1–11 URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005> (дата звернення : 26.06.2024).
11. Перпері А. Використання 3D-друку в сучасному будівництві. URL: <http://surl.li/jtiluh> (дата звернення : 26.06.2024 р.)

REFERENCES

1. Derevyanko V.M., Hryshko H.M. and Vatazhishin O.V. *Modyfikovani kompozytsiyni tsementy systemy $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$* [Modified composite cements of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 3 (015), pp. 59–65. (in Ukrainian).
2. Dvorkin L.Yu., Zhitkovskiy V.V., Stepasyuk Yu.O. and Marchuk V.V. *Efektivni budivel'ni rozchyny dlya 3D-ptyntera* [Effective construction solutions for a 3D printer]. *Budivel'ni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2020, no. 1–2 (101), pp. 16–21. (in Ukrainian).
3. Zgalat-Lozynska L.O. and Zgalat-Lozynskiy O.B. *Rozvytok ta vprovadzhennya innovatsiynykh tekhnolohiy 3D-druku u budivnytstvi* [Development and implementation of innovative 3D printing technologies in construction]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya : Ekonomika i upravlinnya* [Scientific Notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series : Economics and Management]. 2020, vol. 31 (70), no. 5, pp. 45–51. URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7> (in Ukrainian).
4. Komyshev D.G. and Belyatinsky A.O. *Innovatsiyni tekhnolohiyi v budivnytstvi : 3D-druk budivel', mobil'ni prohramy ta shtuchnyy intelekt* [Innovative technologies in construction: 3D printing of buildings, mobile applications and artificial intelligence]. *Tekhnichni nauky* [Technical Sciences]. 2023, iss. 4 (104), pp. 22–43. (in Ukrainian).
5. Dvorkin L.Yu., Marchuk V.V. and Zyatuk Yu.Yu. *Tsementno-shlakovi sumishi dlya 3D-ptynteru* [Cement-slag mixtures for a 3D printer]. *Budivel'ni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2021, no. 1–2 (102), pp. 14–19. (in Ukrainian).
6. Andriychuk O.V. and Olasiuk P.Ya. *Zastosuvannya 3D-tekhnolohiy u budivnytstvi* [Application of 3D technologies in construction]. *Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunku v budivnytstvi* [Modern Technologies and Calculation Methods in Construction]. 2015, vol. 3, pp. 11–18. (in Ukrainian).
7. Petryshyn A.A. *Tendentsiyi rozvytku tryvymirnoho druku, obladnannya ta materialiv dlya n'oho* [Trends in the development of three-dimensional printing, equipment and materials for it]. *Aktual'ni zadachi suchasnykh tekhnolohiy : materialy IV Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh ta studentiv (25–26 lystopada 2015 r.)* [Actual tasks of modern technologies: materials of the IV International scientific and technical conference of young scientists and students (November 25–26, 2015)]. Ternopil, 2015, pp. 26–27. (in Ukrainian).
8. Popadyuk S. *Adytyvne vyrobnytstvo u 2024 rotsi : trendy ta prohnozy* [Additive manufacturing in 2024 : trends and forecasts]. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-manufacturing-trends-2024/> (access date : 06.26.2024). (in Ukrainian).
9. Buswell R.A., Soar R.C., Pendlebury M., Gibb A.G., Edum-Fowte F.T. and Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction. *Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*. Rotterdam. The Netherlands, 2005, pp. 141–150. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (access date : 26.06.2024).
10. Hamidreza Gh.S., Corker J. and Fan M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*. 2018, vol. 93, pp. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005> (access date : 26.06.2024).
11. Perperi A. *Vykorystannya 3D-druku v suchasnomu budivnytstvi* [Use a 3D hand in a random future]. URL: <http://surl.li/jtiluh> (access date : 06.26.2024). (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.09.2024.

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.84.1115

ЕКСПРЕС-МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСТНОЇ ЗДАТНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
СОКОЛОВ І. А.², *докт. техн. наук, проф.*,
СТРЕЖЕКУРОВ Ю. Е.^{3*}, *асп.*,
ТОДОРОВ О. П.⁴, *асп.*,
РАГІМОВ С. Ю.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

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

² Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sokolov.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

^{3*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 097-51-59, e-mail: staty.mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

⁴ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

⁵ Кафедра організації і технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, 61023, Харків, Україна, тел. +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

Анотація. В даній статті зроблений аналіз по методам визначення теплозахисної здатності будівельних конструкцій. А також проведене дослідження по застосуванню експрес методу визначення теплозахисних властивостей матеріалів від променів інфрачервоного діапазону. Причому опираючись на закон Вина за допомогою контролю частоти інфрачервоного випромінення можна моделювати умови з різними температурами джерел. Це реалізовано за допомогою конструктивно нестандартних приладів та підходу до вирішення поставленої задачі у широкому діапазоні температур. **Мета статті** – Досягти результату завдяки використанню сучасних методик програмування алгоритму роботи датчика та приймача на високих частотах і конструювання приладу з використанням мікропроцесорного контролера. **Висновок.** 1. Методика обробки даних з датчиків та варіанти методів фіксації інформації у базах даних. Що дозволяє експрес-методом визначити фактичну ефективність енергозберігаючих матеріалів в будівництві і енергетиці та підвищити якість незалежного контролю за відповідним до нормативів станом захисного одягу та будівельних конструкцій. 2. На основі залежності основних оптичних і теплофізических характеристик, електропровідності від відбивної здатності поверхневого шару теплозахисних матеріалів розроблений і упроваджений прилад рефлектометр для експрес-аналізу цих характеристик. 3. Рефлектометр дозволяє визначати ефективність енергозберігаючих матеріалів на стадії їх експлуатації і проектування.

Ключові слова: теплозахисні матеріали; інфрачервоне випромінення; мікроклімат; енергозбереження; електронна база даних; мікроконтролер; канал інтернет-зв'язку; оптичний датчик; поляризація поверхні; залишкова придатність

IMPROVEMENT OF THERMAL IMAGING CAMERA FOR ASSESSING HEAT FLOW IN WORKPLACES

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SOKOLOV I.A.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
STREZHEKUROV Yu.E.^{3*}, *Postgrad. Stud.*,
TODOROV O.P.⁴, *Postgrad. Stud.*,
RAGIMOV S.Yu.⁵, *Ph.D. in Eng., Assoc. Prof.*

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

² Department of Organization and Construction Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: sokolov.ihor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

^{3*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: staty.mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

⁴ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

⁵ Department of Organization and Technical Support of Emergency Rescue Operations, National University of Civil Protection of Ukraine, 94, Chernyshevska St., Kharkiv, 61023, Ukraine, tel. +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

Abstract. Problem statement. This article analyzes methods for determining the thermal insulation properties of building structures. The research also investigates the application of an express method for determining the thermal insulation properties of materials against infrared radiation. By relying on Wien's Law, through controlling the frequency of infrared radiation, conditions with different temperature sources can be modeled. By relying on Wien's Law, through controlling the frequency of infrared radiation, conditions with different temperature sources can be modeled. This is achieved using structurally non-standard devices and an approach to solving the problem across a wide range of temperatures. **The main objectives include** – Achieving the result through the use of modern programming techniques for algorithmizing the operation of the sensor and receiver at high frequencies, and designing the device using a microprocessor controller. Achieving the result through the use of modern programming techniques for algorithmizing the operation of the sensor and receiver at high frequencies, and designing the device using a microprocessor controller. **Conclusion.** 1. The methodology for processing data from sensors and options for methods of information fixation in databases. This allows for a rapid method to determine the actual efficiency of energy-saving materials in construction and energy, and to enhance the quality of independent control over the compliance of protective clothing and building structures with regulations. 2. Based on the relationship between the main optical and thermophysical characteristics, electrical conductivity from the reflective capacity of the surface layer of thermal insulation materials, a reflectometer device has been developed and implemented for express analysis of these characteristics. 3. The reflectometer allows for determining the efficiency of energy-saving materials during their operation and design stages. 4. Based on the relationship between the main optical and thermophysical characteristics, electrical conductivity from the reflective capacity of the surface layer of thermal insulation materials, a reflectometer device has been developed and implemented for express analysis of these characteristics.

Keywords: thermal protection materials; infrared emitted; microclimate; energy saving; electronic database; microcontroller; Internet communication channel; optical sensor; surface polarization; residual fitness

Постановка проблеми. В будівництві застосовуються різні будівельні матеріали та конструкції, які характеризуються різною теплопровідністю, коефіцієнтом поглинання та відображення інфрачервоних променів, під різним кутом до джерела випромінення теплової енергії. Що визначається структурною характеристикою та окремими властивостями компонентів, які застосовуються при виготовленні матеріалів і будівельних конструкцій.

Як показує практика оцінка властивостей матеріалів і будівельних конструкцій на сьогодні не в повному обсязі відповідає оперативності, що не дозволяє враховувати довідникові характеристики різних матеріалів.

Експрес-метод визначення теплозахисної здатності будівельних конструкцій є цінним інструментом для архітекторів, інженерів і будівельників для

оцінки теплових характеристик будівельних матеріалів і конструкцій. Цей метод дозволяє швидко і точно вимірювати термічний опір будівельних елементів, що важливо для проектування енергоефективних будівель.

Експрес-метод передбачає вимірювання різниці температур між елементом будівлі під час застосування відомого теплового потоку. Аналізуючи термічний опір елемента, можна визначити його теплозахисну здатність і здатність зменшувати теплообмін між внутрішнім і зовнішнім середовищем. Ця інформація має вирішальне значення для проектування комфортних, енергоефективних і екологічних будівель.

Крім того, експрес-метод корисний для визначення енергоефективності існуючих будівель та визначення територій, які потребують покращення. Оцінюючи теплові

характеристики будівельних елементів, таких як стіни, дахи та вікна, професіонали можуть рекомендувати відповідні рішення для модернізації для підвищення енергоефективності будівлі.

Таким чином, Експрес-метод є актуальним і цінним інструментом для визначення теплозахисної здатності будівельних конструкцій. Він надає точну та своєчасну інформацію, необхідну для проектування енергоефективних будівель і підвищення енергоефективності існуючих [1].

Аналіз публікацій. При вирішенні питання забезпечення мікроклімату і енергозбереження в приміщеннях за рахунок сучасних технологій, матеріалів та конструктивних особливостей будівель і споруд [3]. Існує широкий спектр вже існуючих засобів, матеріалів та методів теплозахисту і знов проєктованих, проте для даної мети далеко не всі підходять. попередньо встановлені засоби теплозахисту змінюють з часом свої властивості під дією факторів навколишньої середовища та часу, а для знов створюваних необхідно їх прогнозувати [4; 6]. А отже потрібно приймати рішення чи потрібно в конкретний час замінювати захист чи ні. І тоді виникає необхідність досліджувати фактичну ефективність нанесених теплозахисних фарб і матеріалів, не руйнуючи їх основи та облаштування. Це досягається використанням експрес-методу дослідження вже існуючих будівельних конструкцій і зразків знов створених. Проте подібних малогабаритних пристроїв немає, або вони в повному обсязі не визначають потрібні характеристики [8].

Тому розробка експрес-метода визначення теплозахисної здатності матеріалів та конструкцій є актуальною задачею.

Мета дослідження – розробка обладнання для експрес-методу визначення теплозахисних властивостей існуючих і новостворених конструкцій є надання фахівцям ефективного та точного інструменту для оцінки теплотехнічних характеристик будівельних матеріалів і конструкцій. Розробка такого обладнання має важливе значення для архітекторів, інженерів і будівельників для проектування енергоефективних будівель і підвищення енергоефективності існуючих. За

допомогою цього обладнання професіонали можуть швидко і точно виміряти термічний опір будівельних елементів, таких як стіни, дахи, вікна, і визначити їх теплозахисну здатність. Оцінюючи теплові характеристики будівельних елементів, професіонали можуть рекомендувати відповідні рішення для модернізації для підвищення енергоефективності будівлі. У новостворених будівлях обладнання можна використовувати для перевірки теплових характеристик будівельних елементів і забезпечення відповідності будівлі необхідним стандартам теплотехнічних характеристик. Загалом розробка обладнання для експрес-методу визначення теплозахисних властивостей існуючих та новостворених конструкцій є критично важливою для проектування енергоефективних будівель та підвищення енергоефективності існуючих. Він надає фахівцям необхідну інформацію для прийняття обґрунтованих рішень і рекомендує відповідні рішення для покращення теплових характеристик будівель.

Матеріали та методи дослідження. Існує кілька методів дослідження для визначення теплозахисних властивостей вже існуючих і новостворених конструкцій. Ось кілька поширених методів:

1. Експрес-метод: Як згадувалося раніше, ЕКСПРЕС-МЕТОД передбачає вимірювання різниці температур на будівельному елементі під час застосування відомого теплового потоку. Цей метод дозволяє швидко і точно вимірювати термічний опір будівельних елементів, що важливо для проектування енергоефективних будівель.

2. Метод вимірювання теплового потоку: метод вимірювання теплового потоку передбачає вимірювання теплового потоку через елемент будівлі шляхом вимірювання різниці температур на ньому та визначення його теплопровідності. Цей метод корисний для оцінки теплових характеристик ізоляційних матеріалів.

3. Інфрачервона термографія: інфрачервона термографія передбачає використання тепловізійної камери для виявлення різниці температур на поверхні будівельних елементів. Цей метод корисний для виявлення зон тепловтрат і теплових мостів в існуючих будівлях.

4. Тест у гарячому боксі: Тест у гарячому боксі передбачає вимірювання термічного опору та коефіцієнта теплопередачі будівельних елементів у контрольованому середовищі. Цей метод дозволяє проводити точні вимірювання теплових характеристик будівельних елементів у різних умовах навколишнього середовища.

5. Обчислювальне моделювання: обчислювальне моделювання передбачає використання комп'ютерного програмного забезпечення для моделювання теплопередачі та теплових характеристик будівельних елементів. Цей метод корисний для прогнозування теплових характеристик будівель та оцінки ефективності рішень з модернізації.

Загалом вибір методів дослідження для визначення теплозахисних властивостей уже існуючих і новостворених конструкцій залежатиме від конкретних вимог проекту та наявних ресурсів. Комбінація цих методів також може бути використана для забезпечення більш повної оцінки теплових характеристик будівельних елементів.

Результати досліджень. Недосконалість існуючих методів дослідження визначення теплозахисних властивостей можна усунути шляхом розробки більш комплексного та комплексного підходу до оцінки теплових характеристик будівельних елементів [2; 7]. Ось кілька потенційних кроків для розробки такого підходу:

Визначте обмеження та недоліки існуючих методів дослідження: перш ніж розробляти новий підхід, важливо зрозуміти обмеження та недоліки існуючих методів дослідження. Це допоможе визначити сфери, де потрібні покращення.

Інтеграція кількох методів дослідження: Замість того, щоб покладатися на один метод дослідження, можна розробити комплексний підхід, який поєднує декілька методів дослідження. Наприклад, поєднання інфрачервоної термографії, випробувань гарячого боксу та обчислювального моделювання може забезпечити більш повну оцінку теплових характеристик будівельних елементів.

Включіть динамічне теплове моделювання: використання динамічного теплового моделювання може забезпечити точнішу оцінку теплових характеристик

будівельних елементів у різних умовах навколишнього середовища. Це передбачає моделювання динамічної поведінки теплопередачі та споживання енергії з часом.

Оцініть вплив експлуатації будівлі та поведінки мешканців: на теплові характеристики будівель впливають не лише елементи будівлі, але й експлуатація будівлі та поведінка мешканців. Підхід, який враховує ці фактори, може забезпечити точнішу оцінку теплових характеристик будівель.

Розробка стандартів і настанов: розробка стандартів і настанов може гарантувати, що підхід є послідовним, а отримані результати надійними та порівнянними.

Загалом, розробка інтегрованого підходу, який враховує обмеження існуючих методів дослідження, включає динамічне теплове моделювання, оцінює вплив експлуатації будівлі та поведінки мешканців, а також включає стандарти та рекомендації, може вирішити проблему недосконалості існуючих методів дослідження для визначення теплозахисту. властивості. Цей підхід може забезпечити більш повну та точну оцінку теплових характеристик будівельних елементів і допомогти у проектуванні енергоефективних будівель. А отже енергозбереження, забезпечення мікроклімату відповідно до норм і стандартів, а також безпеці праці на робочих місцях з підвищеним тепловиділенням може бути забезпечений, якщо будуть застосовані ефективні засоби енергозбереження та захисту. Високої ефективності засобів теплозахисту можна досягти тільки тоді, якщо враховувати не тільки аераційний і теплопровідний розподіл тепла, а і спектральний розподіл енергії випромінювання в робочих приміщеннях і на робочих місцях, оптичні властивості теплозахисних матеріалів і вибір вигляду і конструкції засобів теплозахисту і енергозбереження. Ступінь цього захисту і створення сприятливих санітарно гігієнічних умов залежатиме від таких властивостей матеріалів, як здатність поверхні «дихати», ступінь чорноти, теплопровідність і електропровідність поверхневого шару, коефіцієнт відображення і поглинання.

Звичайно оптичні характеристики теплозахисних і енергозберігаючих матеріалів

досліджують в лабораторних умовах на стаціонарних установках. Нам же необхідно визначити ефективність вже встановлених і працюючих у виробничих умовах засобів енергозбереження і теплозахисту. При вилученні зразка з готової працюючої конструкції, для звичайних методів дослідження, порушується структура і стан поверхні теплозахисного матеріалу, що спотворює результати досліджень. В таких випадках найефективніший експрес-метод неруйнуючого контролю. Одним з таких раніше розроблених приладів є ТП-4 і ТПМ-1 для визначення теплофізичних характеристик гірських порід методом неруйнуючого контролю [2; 3], область застосування їх спеціалізована і вузька, вимагає прямого контакту з досліджуванним матеріалом.

Для визначення оптичних характеристик теплозахисних матеріалів таких, як металеві поверхні, металізовані тканини і полімерні матеріали – потрібен інший принцип неконтактного і не руйнованого контролю. Тому був розроблений і створений прилад-рефлектометр, а його випробування і упродовження показали, що в порівнянні із звичайними лабораторними методами, значно (в 20–50 разів) збільшується продуктивність, істотно в 10–20 разів, знижуються витрати на проведення експерименту за визначенням ефективності теплозахисних матеріалів експрес-методом.

Функціональна схема рефлектометра приведена на рисунку 1.

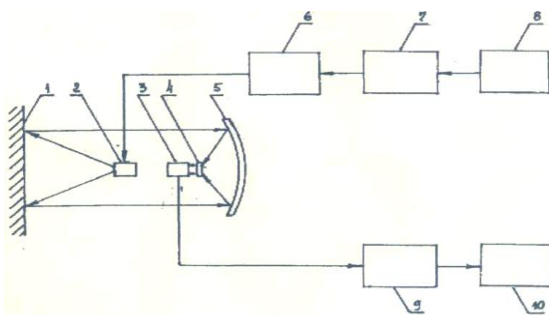


Рис. 1. Функціональна схема рефлектометра

Принцип дії рефлектометра заснований на віддзеркаленні модульованого інфрачервоного випромінювання від досліджуваної поверхні 1. Як джерело інфрачервоного випромінювання використаний інфрачервоний світлодіод (2). Інфрачервоний світлодіод живиться від

генератора імпульсів 6, модуляція здійснюється задаючим генератором 7, 8 – джерело живлення 9 В. Відбита частина інфрачервоного випромінювання потрапляє на увігнуте дзеркало 5, фокусується на конденсорі 4 прямує на фотодіод 3, сигнал з фотодіода передається на підсилювач 9 з індикацією 10.

Зовнішній вигляд рефлектометра представлений на рисунку 2. Датчик рефлектометра встановлюється для калібрування на зразковій еталонній пластині досліджувана поверхня використовувалися такі матеріали, як дерево, цеглина, скло, штукатурні стіни, пластичні маси, тканини з натуральних і штучних волокон, просочені спеціальними складами і покриті алюмінієвою фольгою, металеві поверхні – забарвлені, оброблені хімічними речовинами.

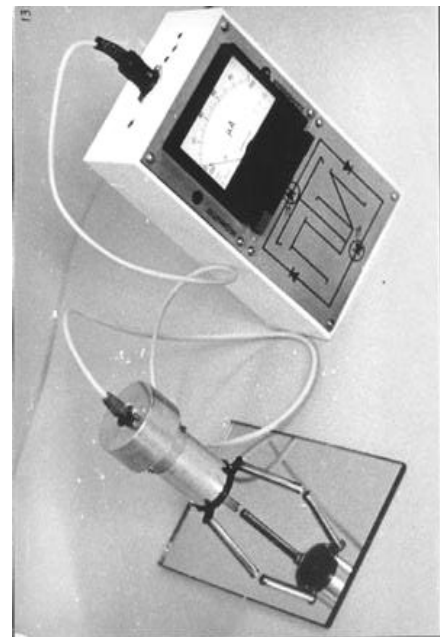


Рис. 2. Зовнішній вигляд рефлектометра

Рефлектометр має наступні характеристики:

- Межа вимірювання, в %	до 100
- Погрішність вимірювання, не більш %	5
- Вага, не більш, кг	1
- Споживана потужність, не більш, Вт	1
- Час вимірювання, сек	до 5

Для перевірки рефлектометра була розроблена установка для стаціонарного дослідження властивостей теплозахисних матеріалів. Яка складається з круглої рамки, куди поміщалися зразки теплозахисних

матеріалів. Рамка має ступені свободи обертання, як навкруги вертикальної осі, так і навкруги горизонтальної. В горизонтальній площині, що проходить через центр рамки, що обертається, переміщуються на рухомих направляючих випромінювач і приймач інфрачервоного модульованого випромінювання. Приймач і випромінювач забезпечений оптичними системами і може переміщатися по дузі в 360° . Зовнішній вигляд дослідницької установки представлений на рисунку 3.

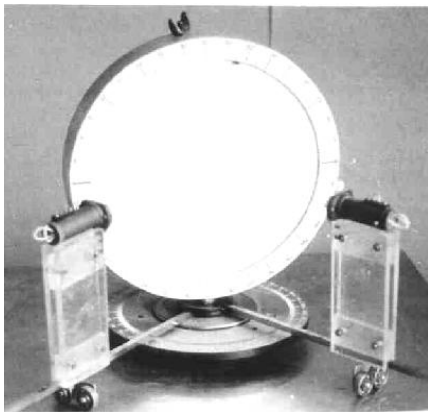


Рис. 3. Загальний вид експериментальної установки для визначення оптичних характеристик в ІЧ діапазоні теплозахисних та теплоізолюючих матеріалів

Методика підбору складу теплозахисних матеріалів і покриттів полягає в узгодженні спектрів випромінювання від джерела теплового випромінювання і спектрів поглинання (віддзеркалення) залежно від мети теплозахисту. Проте спектр джерел випромінювання частіше всього буває суцільним і має чітко виражений максимум енергії випромінювання в якомусь спектральному діапазоні. Цей максимум залежно від температури джерела випромінювання за законом Вина може зміщуватися або в короткохвильову, або довгохвильову частину спектру. На відміну від випромінювачів спектри поглинання і віддзеркалення теплозахисних матеріалів і покриттів мають дуже складну і переривисту форму у вигляді провалів і максимумів. Тому розроблена спеціальна програмний комплекс на мові програмування для обчислювальної техніки, яка дозволяє розрахувати та наглядно показати виходячи з температури джерела випромінювання його максимум випромінювальної здатності в спектральному

діапазоні. Потім на спектральну криву випромінювальної здатності джерела випромінювання накладаються спектри поглинання(віддзеркалення) теплозахисних матеріалів. Шляхом підбору компонентів добиваються повного перекриття спектру випромінювача, для цього можуть бути використано декілька компонентів. Другий етап полягає в підборі процентного змісту компоненту складових залежно від загальної енергії джерела випромінювання.

Крім того, деякі теплозахисні матеріали можуть поляризувати падаюче випромінювання і мають об'ємне віддзеркалення, відмінне від Ламбертовського розподілу. Розподіл Ламберта передбачає, що відбиття випромінювання є дифузним та ізотропним, тобто відбите випромінювання розсіюється в усіх напрямках з однаковою ймовірністю. Однак насправді багато поверхонь демонструють дзеркальне відображення, тобто відбите випромінювання концентрується в певному напрямку. Поляризація також є суттєвим фактором відбиття випромінювання. Поляризація відноситься до орієнтації вектора електричного поля випромінювання. Коли випромінювання відбивається від поверхні, вектор електричного поля відбитого випромінювання може бути орієнтований у певному напрямку. Ступінь поляризації залежить від кута падіння і властивостей поверхні. Деякі матеріали можуть відбивати випромінювання з високим ступенем поляризації, тобто вектор електричного поля відбитого випромінювання орієнтований у певному напрямку. Тому при проектуванні теплозахисних матеріалів важливо враховувати їх властивості відбиття, включаючи поляризацію та тривимірне відображення. Ця інформація може допомогти покращити характеристики матеріалів щодо відображення або поглинання випромінювання залежно від конкретного застосування.

Для зразків виготовляються плоскі диски, на які наносяться досліджувані суміші. При зміні кутів падіння і віддзеркалення при обертанні диска з рамкою ми одержуємо повну об'ємно просторову картину відбивної здатності теплозахисних матеріалів в ІК діапазоні.

На рисунку 4 показані, як зразок, спектри відбивної здатності широко найрозповсюджених будівельних матеріалів, які накладаються на спектри випромінювання

джерел з різною температурою нагріву. При цьому наочно видно, які ділянки спектру джерел випромінювання необхідно «перекрити».

В даному конкретному випадку нам необхідно до складу покриття внести компоненти будівельних матеріалів, що мають максимум спектрального віддзеркалення в діапазоні 1,8–4,0 мкм, при дії високотемпературного джерела. При захисті від теплового випромінювання низькотемпературних джерел необхідно додавати компоненти з відповідними оптичними характеристиками, які перекривають ІК діапазоні від 4 до 9 мкм.

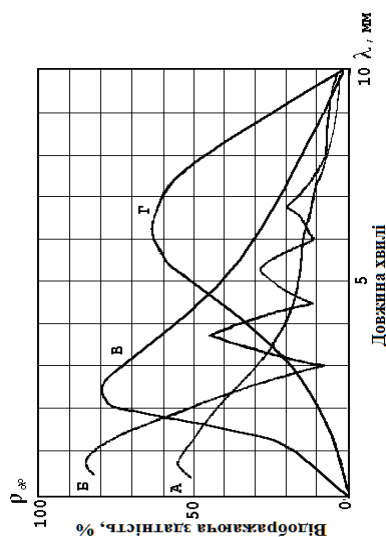


Рис. 4. Спектральні характеристики будівельних матеріалів та джерел теплового випромінювання: А – керамічна плитка; В – гіпсова штукатурка; В – джерело теплового випромінювання з температурою 1723 К; Г – джерело теплового випромінювання з температурою 573 К

Все це дозволяє, ще на стадії проектування будівельних, теплозахисних конструкцій, підбирати теплозахисні матеріали, покриття, обмазки і ін. залежно від кліматичних, техногенних і інших чинників.

Технічне підключення та електроніка датчиків для експрес-дослідження теплозахисних властивостей матеріалів і конструкцій буде залежати від конкретних вимог використовуваного методу дослідження. Ось деякі загальні кроки та міркування щодо розробки технічної проводки та електроніки датчиків і стенду:

– Для нашого прилада оберемо інфрачервоний світло діод та інфрачервоний датчик. Визначаємо систему збору даних:

система збору даних відповідає за збір даних із датчиків і передачу їх на комп'ютер або інший пристрій зберігання даних. Система може бути дротовою або бездротовою, а конкретні компоненти залежатимуть від використовуваних датчиків і використовуваного методу дослідження.

– Розробляємо систему контролю: система контролю відповідає за регулювання дослідницького стенду та забезпечення послідовного та точного проведення експерименту. Система керування може бути як ручною, так і автоматизованою, а конкретні компоненти залежатимуть від датчиків, що використовуються, і методу дослідження, який використовується.

– Розробляємо інтерфейс програмного забезпечення: інтерфейс програмного забезпечення є інтерфейсом користувача для дослідницького стенду та відповідає за відображення даних від датчиків, керування експериментом і зберігання даних. Програмний інтерфейс можна розробити на замовлення або створити за допомогою комерційних пакетів програмного забезпечення.

– Конструюємо фізичний стенд: Фізичний стенд залежатиме від використовуваного методу дослідження та розміру матеріалів або конструкцій, що тестуються. Стенд має бути сконструйований для розміщення датчиків, системи керування та системи збору даних і має бути виготовлений із матеріалів, стійких до тепла та корозії.

Загалом технічна розводка та електроніка датчиків і стенду для експрес-дослідження теплозахисних властивостей матеріалів і конструкцій потребують ретельного обмислення та планування для отримання точних і надійних результатів. Конкретні компоненти та конструкція залежатимуть від використовуваного методу дослідження та вимог експерименту.

Висновки

На основі залежності основних оптичних і теплофізических характеристик, електропровідності від відбивної здатності поверхневого шару теплозахисних матеріалів розроблений прилад рефлектометр для експрес-аналізу цих характеристик. Рефлектометр дозволяє

визначати ефективність енергозберігаючих проектування.
матеріалів на стадії їх експлуатації і

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шаленний В. Т., Шаломов В. А., Папірник Р. Б. Напрямки удосконалення сучасних технологій, матеріалів і обладнання із врахуванням енергетичних витрат та умов праці будівельних робітників. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. 2010. Вип. 52. С. 127-131.
2. Бєліков А. С., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю., Михайлов М. О. Фізичне моделювання зміни енергетичного впливу на робочі місця з урахуванням високотемпературного випромінювання. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. Вип. 4. С. 10-17.
3. Стрежекуров Э. Е. Комплексное решение задач теплозащиты рабочих мест и охраны окружающей среды от теплового загрязнения. *Приборы для экологии-92*. 1992.
4. Біляєв М. М. Математичне моделювання розрахунку параметрів мікроклімату в робочих зонах. *Проблеми математичного моделювання*. 2020. С. 6-8.
5. Стрежекуров Ю. Е. Аналіз впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті*. 2024.
6. Стрежекуров Ю. Е. Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces. *Виклики та проблеми сучасної науки*. 2023. С. 598-610.
7. Бєліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю. До питання комплексного впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. Вип. 1. С. 26-32.
8. Бєліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Рагімов С. Ю., Харченко В. В. До питання комплексного оцінки впливу теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням забруднення повітряного середовища. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. Вип. 6. С. 7-15.

REFERENCES

1. Shalennuy V.T., Shalomov V.A. and Papirnik R.B. *Napriamki udoskonalennia suchasnykh tekhnologiy, materialiv i obladannia iz vrakhuvanniam energetychnykh vutrat ta umov pratsi budivel'nykh robnikiv* [Directions for improving modern technologies, materials and equipment, taking into account energy costs and working conditions of construction workers]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction Materials science. Mechanical engineering]. 2010, no. 52, pp. 127-131.
2. Bilikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuvannia zminu energetychnogo vplivu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuvannia* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnuk Prudniprovs'koi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitektura* [Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture]. 2017, no. 4, pp. 10-17.
3. Strezhekurov E.E. *Kompleksnoie reshenie zadach teplozashchity rabochikh mest i okhrany okruzhaiushchei sredy ot teplovogo zagriazaniia* [A comprehensive solution to the problems of thermal protection of workplaces and environmental protection from thermal pollution]. *Priboru dlia ekologii-92* [Devices for ecology-92]. 1992.
4. Bilaiev M.M. *Matematichne modeliuvannia rozrachku parametriv mikroklimatu v robochikh zonakh* [Mathematical modeling of the calculation of microclimate parameters in working areas]. *Problemu matematichnogo modeliuvannia* [Problems of mathematical modeling]. 2020, pp. 6-8.
5. Strezhekurov Yu.E. *Analiz vplivu negativnih ta shkidlivih faktoriv na viniknennia profesiynih zahvoryuvan* [Analysis of the influence of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Bezpeka zhitediialnosti v XXI stoliti* [Life Safety in the XXI Century]. 2024.
6. Strezhekurov Yu.E. [Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces]. *Vikliki ta problemi suchasnoy nauki* [Challenges and problems of modern science]. 2023, pp. 598-610.
7. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Shalomov V.A. and Ragimov S.Yu. *Do pitanya kompleksnogo vplivu negativnih ta shkidlivih faktorivna viniknennia profesiynih zahvoryuvan* [To the question of the complex impact of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Visnuk Prudniprovs'koi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitektura* [Ukrainian Journal of Construction and Architecture]. 2024, no. 1, pp. 26-32.
8. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Ragimov S.Yu. and Kharchenko V.V. *Do pitanya kompleksnogo ocinki vplivu teplovogo viprominyuvanya na robochih misyach z urahuvanyam zabrudnenia povitryanogo seredovisha* [To the question of the complex assessment of the impact of heat radiation at workplaces taking into account air pollution]. *Visnuk Prudniprovs'koi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitektura* [Ukrainian Journal of Construction and Architecture]. 2023, no. 6, pp. 7-15.

Надійшла до редакції: 21.10.2024.

УДК 614.8

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.92.1116

ДО ПИТАННЯ РЕАГУВАННЯ НА ВИНИКНЕННЯ НС В ПРИДНІПРОВСЬКОМУ РЕГІОНІ ТА ВОЄННИЙ СТАН В УКРАЇНІ

КУЛЬБАЧ А. А.¹, *канд. техн. наук*,
БЕЛІКОВ А. С.², *докт. техн. наук, проф.*,
СУГАК А. О.³, *полковник служби цивільного захисту*,
КЛИМЕНКО Г. О.^{4*}, *канд. техн. наук, доц.*,
РАГІМОВ С. Ю.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Перший заступник голови Дніпропетровської ОВА, Дніпропетровська обласна військова адміністрація, пр. Олександра Поля, 1, м. 49000, Дніпро, Україна, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5571-791X

² Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

³ Перший заступник начальника головного управління ДСНС України у Дніпропетровській області, вул. Первозванівська 4, 49000, Дніпро, Україна

^{4*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки. Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: klimenko.anna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144

⁵ Кафедра організації і технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт, Національний університет цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, 18034, Черкаси, Україна, e-mail: sergragimov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

Анотація. Одна з найактуальніших задач в Україні в цілому та Дніпровському регіоні сьогодні, під час дії воєнного стану, – це збереження життя та здоров'я людей, захист матеріальних цінностей, підприємств, споруд, комунікацій, природного фонду, тощо. Наразі, це – є виклик для людей, задіяних в рятувальних операціях, особливо, коли до НС техногенного та природного характеру додаються НС воєнного характеру. Пожежі, радіаційна небезпека, хімічна небезпека, небезпеки на магістральних газопроводах і електричних мережах – все це створює передумови морального, психологічного та фізичного виснаження особового складу підрозділів ДСНС і населення країни. Тому, постійний аналіз виникнення надзвичайних ситуацій, їх причин і наслідків дозволяє удосконалювати забезпечення оперативного реагування на виникнення НС в регіонах. **Мета статті.** Визначення основних напрямків забезпечення функціонування об'єктів на території Придніпровського регіону з урахуванням воєнного стану та присутності в регіоні об'єктів потенційної небезпеки та об'єктів критичної інфраструктури. **Висновки.** Придніпровський промисловий регіон є одним із значимих в забезпеченні функціонування національної економіки держави. Розробка ефективних заходів та забезпечення оперативного реагування на виклики виникнення НС в регіоні – є запобіганням їх виникнення, ліквідації та зменшення наслідків при можливому їх виникненні, з урахуванням воєнного стану в Україні.

Ключові слова: *надзвичайна ситуація; критична інфраструктура; пожежа; хімічно-небезпечний об'єкт; об'єкт підвищеної небезпеки*

ON THE QUESTION OF THE RESPONSE TO EMERGENCIES IN THE DNIPROVIAN REGION AND THE MARTIAL STATE IN UKRAINE

KULBACH A.A.¹, *Ph. D., Cand. Sc. (Tech.)*,
BIELIKOV A.S.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SUGAK A.O.³, *Colonel of the civil defense service*,
KLYMENKO G.O.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
RAHIMOV S.Yu.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Deputy Head of the Dnipropetrovsk Regional State Administration, Dnipropetrovsk Regional Military Administration, 1, Oleksandra Polya Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5571-791X

² Department of Occupational Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-03-25, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

³ The first deputy head of the Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in the Dnipropetrovsk region, 4, Pervozvanivska St., Dnipro, 49000, Ukraine

^{4*} Department of Occupational Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-03-25, e-mail: klimenko.anna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144

⁵ Department of Logistics and Technical Support of Rescue Operations, National University of Civil Protection of Ukraine, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18034, Ukraine, tel.+38 (050) 582-59-87, e-mail: sergragimov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

Abstract. One of the most urgent tasks in Ukraine as a whole and the Dnipro region today, during the martial law, is the preservation of life and health of people, protection of material values, enterprises, structures, communications, natural resources, etc. Currently, this is a challenge for people involved in rescue operations, especially when military emergencies are added to man-made and natural emergencies. Fires, radiation danger, chemical danger, dangers on main gas pipelines and electrical networks – all this creates prerequisites for moral, psychological and physical exhaustion of the personnel of the units of the State Emergency Service and the population of the country. Therefore, the constant analysis of the emergence of emergency situations, their causes and consequences allows to improve the provision of operational response to the occurrence of emergencies in the regions. **The purpose of the article.** Determination of the main directions of ensuring the functioning of facilities in the territory of the Dnipro region, taking into account the state of war and the presence of potentially dangerous facilities and critical infrastructure facilities in the region. **Conclusions.** The Dnieper industrial region is one of the important ones in ensuring the functioning of the national economy of the state. The development of effective measures and the provision of prompt response to the challenges of emergencies in the region are the prevention of their occurrence, liquidation and reduction of consequences in the event of their possible occurrence, taking into account the state of war in Ukraine.

Keywords: *emergency situation; critical infrastructure; fire; chemically hazardous facility; high-risk facility*

Актуальність. Одна з найактуальніших задач в Україні в цілому та Дніпровському регіоні сьогодні, під час дії воєнного стану, – це збереження життя та здоров'я людей, захист матеріальних цінностей, підприємств, споруд, комунікацій, природного фонду, тощо. Наразі, це – є виклик для людей, задіяних в рятувальних операціях, особливо, коли до НС техногенного та природного характеру додаються НС воєнного характеру. Пожежі, радіаційна небезпека, хімічна небезпека, небезпеки на магістральних газопроводах і електричних мережах – все це створює передумови морального, психологічного та фізичного виснаження особового складу підрозділів ДСНС і населення країни. Тому, постійний аналіз виникнення надзвичайних ситуацій, їх причин і наслідків дозволяє удосконалювати забезпечення оперативного реагування на виникнення НС в регіонах.

Мета статті. Визначення основних напрямків забезпечення функціонування об'єктів на території Придніпровського регіону з урахуванням воєнного стану та присутності в регіоні об'єктів потенційної небезпеки та об'єктів критичної інфраструктури.

Результати досліджень. Відомо, що безпека критичної інфраструктури – це стан захищеності критичної інфраструктури, за якого забезпечуються функціональність,

безперервність роботи, відновлюваність, цілісність і стійкість критичної інфраструктури. Захист критичної інфраструктури об'єднує види діяльності, спрямовані на своєчасне виявлення, запобігання і нейтралізацію загроз безпеці об'єктів критичної інфраструктури, а також мінімізацію та ліквідацію наслідків у разі їх реалізації [1]. В [2–4] наведено перелік секторів критичної інфраструктури; національний план захисту та забезпечення безпеки та стійкості критичної інфраструктури і суб'єкти захисту критичної інфраструктури та механізми їх діяльності, відповідно.

Дніпропетровська область знаходиться у південно-східній частині України, в басейні середньої і нижньої течії Дніпра. На сході вона межує з Донецькою, на півдні – із Запорізькою і Херсонською, на заході – з Миколаївською та Кіровоградською, на півночі – з Полтавською та Харківською областями України. Площа території області складає 31,92 тис. км².

В області близько 1,5 тисячі водойм та ставків площею понад 26 тисяч гектарів.

На території Дніпропетровської області знаходиться 76 об'єктів критичної інфраструктури, 332 об'єкта підвищеної небезпеки та 95 хімічно-небезпечних об'єктів, 2 275 закладів освіти, 593 заклади охорони здоров'я, 35 енергетичних об'єктів,

з яких 6 об'єктів електрогенерації (ТЕЦ, ТЕС, ГЕС тощо) та 29 об'єктів передачі та розподілу електричної енергії (електропідстанції), 238 установ фінансово-економічного забезпечення та соціального захисту (казначейство, банки, Державна податкова служба, управління пенсійного фонду, управління соціального захисту), 523 об'єкта (установки) забезпечення мобільного зв'язку.

З початку року підрозділами Головного управління здійснено 27 тис. 653 оперативних виїздів, з них:

1) 14 тис. 940 на ліквідацію пожеж та загорянь, з яких:

- 2 тис. 281 пожеж у житловому секторі;
- 747 пожеж у нежитловому секторі;
- 230 пожежі на об'єктах

господарування;

- 359 пожежі на транспорті;

- 11 тис. 521 пожеж у природних екосистемах на загальній площі близько 9 тис. 116 га, з яких:

- 8 тис. 728 пожеж сухої трави та очерету (площа понад 8 тис. 382 га),
- 2 тис. 462 пожеж сміття (площа понад 108 га),
- 112 лісові пожежі (площа понад 432 га),
- 78 пожежі на сільгоспугіддях (площа понад 193 га).

Під час ліквідації пожеж виявлено 107 осіб без ознак життя (з них 4 дитини), врятовано 297 осіб (з них 35 дітей), постраждало 153 особи (з них 13 дітей).

2) 109 подій виникли на водоймах області, на яких загинуло 93 особи (з них 7 дітей) та врятовано 38 осіб (з них 2 дитини).

З початку збройної агресії здійснено – 12 тис. 045 виїздів на події внаслідок обстрілів (з початку 2024 р. – 4 тис. 471 виїзд), з яких: 950 – на пожежі (з початку 2024 р. – 436), 85 – проведення АРР (з початку 2024 р. – 28), 1 тис. 342 – знешкодження ВВП (з початку 2024 р. – 425), 9 тис. 668 – надання допомоги та ідентифікація (з початку 2024 р. – 3 тис. 582).

За інформацією, наявною в Головному управлінні, по території області здійснено

понад 8 тис. 660 обстрілів, з них 4 тис. 840 обстрілів з початку 2024 р. (понад 760 ракетних (220 – 2024 р.) та 3 тис. 400 дронів-камікадзе (2 тис. 920 – 2024 р.)).

Врятовано – 275 осіб, з них 82 особи з початку 2024 року.

Травмовано – 2 258 осіб (819 осіб з початку 2024 р.)/159 дітей (66 з початку 2024 р.) (23 співробітника ГУ (3 з початку 2024 р.)).

Загинуло – 402 осіб (107 осіб з початку 2024 р.)/25 дитини (6 дітей з початку 2024 р.) (6 співробітників ГУ, з початку 2024 року – 2 співробітника).

Зруйновано понад 800 будівель, споруд і комунікацій, з яких 122 приватних житлових будинків.

Пошкоджено понад 20 тис. 890 будівель, споруд та комунікацій, з яких 9 тис. 387 приватних житлових будинків та 1 тис. 805 багатоквартирних житлових будинків.

Пошкоджено:

Об'єкти життєзабезпечення – 2 тис. 213 (1 тис. 451 – енерго, 702 – газо, 58 – водо, 2 – теплопостачання).

Об'єкти транспортної інфраструктури 139 (80 – залізниці, 42 – автотранспорту, 9 – повітряного транспорту, 6 – водного транспорту, 2 – інші)

Протягом ведення активних бойових дій піротехнічними розрахунками Головного управління здійснено роботи з виявлення та знищення 8 тис. 935 од. боєприпасів, з них 1054 од. з початку 2024 року (з яких 7 тис. 939 од. сучасних (732 од. з початку 2024 року) та 996 од. застарілих боєприпасів (322 од. – 2024р.), з них:

- на території Дніпропетровської області – 7 тис. 480 од. сучасних та 935 од. застарілих боєприпасів;

- на території Херсонської області – 459 од. сучасних боєприпасів.

Для реагування на виклики воєнного стану у 2023 році створено 6 МПРП.

Для забезпечення 20-ти хвилинного прибуття першого підрозділу на території області необхідно створити ще 48 МПРП.

У 2024 році відкрито 3 МПРП.

Аналіз техногенно-екологічної обстановки в Дніпропетровській області. Радіаційна небезпека, пов'язана насамперед

з розташуванням на кордоні області Запорізької АЕС.

При радіаційній аварії на Запорізькій АЕС з викидом радіоактивних речовин можливе радіаційне забруднення частини території Дніпропетровської області, яке спричинить санітарні, безповоротні втрати людей, часткову втрату промислового та сільськогосподарського виробництва.

До можливої зони небезпечного радіоактивного забруднення потрапляють 98 населених пунктів, в тому числі 3 міста (Нікополь, Марганець, Покров) із загальною чисельністю населення 171 тис. чол.

Крім цього, радіаційна небезпека обумовлена розташуванням промислових потужностей колишнього виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» в м. Кам'янське (далі – ВО «ПХЗ»), на сьогоднішній день – ДП «Бар'єр» здійснює охорону майданчиків.

Внаслідок функціонування ВО «ПХЗ» утворено 9 хвостосховищ відходів уранового виробництва та 2 сховища радіоактивних відходів, які містять понад 42,0 млн. тон радіоактивних речовин загальною активністю 86,0 тис. кюрі.

У разі руйнування дамби хвостосховищ існує вірогідність потрапляння радіоактивних речовин до р. Дніпро.

Крім цього, на території м. Дніпро розташована Дніпровська міжобласна філія Державне спеціалізоване підприємство «Об'єднання «Радон», який здійснює тимчасове зберігання покинутих джерел іонізуючого випромінювання, перевезення радіоактивних відходів та залучається до реагування на радіаційні аварії на території області. Сховище покинутих джерел іонізуючого випромінювання та радіоактивних відходів знаходиться на території Дніпровського району. За інформацією підприємства радіоактивні відходи вивезені на територію інших комбінатів.

Хімічна небезпека. Всього в Дніпропетровській області класифіковано та затверджено протоколом засідання регіональної комісії з питань ТЕБ і НС від 27.12.2023р. № 64 – 95 хімічно небезпечних об'єктів (далі – ХНО), які використовують

близько 53 тис тон небезпечних хімічних речовин. (9 ХНО першого ступеню хімічної небезпеки; 21 ХНО другого ступеню хімічної небезпеки; 14 ХНО третього ступеню хімічної небезпеки; 51 ХНО четвертого ступеню хімічної небезпеки.

На цих об'єктах зберігається або використовується у виробничій діяльності близько 53 тис. тон небезпечних хімічних речовин (з них: 1 тис. 340 т хлору, 39 тис. 500 т аміаку та 12 тис. 400 т інших небезпечних хімічних речовин).

Всього у зонах можливого хімічного забруднення на території області мешкає 1,3 млн. осіб.

Об'єкти, що створюють значну хімічну небезпеку для області:

АТ «Дніпроазот» (м. Кам'янське), зберігається 16 000 тон аміаку, у разі руйнування ємностей глибина зони можливого хімічного забруднення складає 34,63 км, площа – 126 км², до зони можливого хімічного забруднення потрапляє 726,74 тис. осіб;

ТОВ «Аульська хлорпереливна станція» (Кам'янський район), зберігається 275 т хлору у разі руйнування ємностей, глибина зони можливого хімічного забруднення складає – 19,23 км, площа – 40 км², до зони можливого хімічного забруднення потрапляє 119 тис. осіб;

КП «Кривбасводоканал» Радужанська хлорпереливна станція (Криворізький район), зберігається 96 т. хлору, у разі руйнування ємностей, глибина зони можливого хімічного зараження складає – 37,6 км, площа – 64 км², до зони можливого хімічного зараження потрапляє 203,479 тис. осіб;

ДП ВО «Південний машинобудівний завод», м. Дніпро (гептил – 135 т, аміл – 325 т), глибина зони можливого хімічного забруднення – 2,3 км;

УДП «Укрхімтрансміак», Придніпровського та Миколаївського управління магістрального аміакопроводу, аміакопровод проходить по Павлоградському, Синельниківському, Дніпровському, Нікопольському та Криворізькому районах, глибина зони можливого хімічного забруднення глибина – 7,69 км,

максимальне можливе накопичення аміаку між відсикателями становить до 555 т.

Забезпеченість непрацюючого населення, яке проживає у прогнозованих зонах хімічного забруднення, засобами індивідуального захисту органів дихання від небезпечних хімічних речовин складає 8,3 % (28 839 од.) від потреби (потреба 334 929 од.).

Забезпеченість працівників хімічно-небезпечних підприємств засобами індивідуального захисту складає 94 % (25 317 од.) від потреби (потреба 27 253 од.).

Забезпеченість працівників підприємств області, розташованих у зонах можливого хімічного забруднення засобами радіаційного та хімічного захисту становить 43 % (132,935 од.) від потреби (потреба 312 395 од.).

Забезпеченість непрацюючого населення, яке проживає у зоні спостереження Запорізької АЕС (це населення Нікопольського району) становить 100 %.

В наявності знаходиться 113,886 тис. од. респіраторів (потреба становить 80,716 тис. од.).

Зберігання ЗІЗОД в області організовано в резерві облдержадміністрації (5 складів зберігання) і запасах суб'єктів господарювання.

Забезпеченість формувань в Дніпропетровській області складає: приладами радіаційної розвідки – 28,23 %, хімічної розвідки – 14,6 %, дозиметричного контролю – 29,6 %, фільтруючими протигазами – 34,4 %; ізолюючими протигазами – 21,18 %; промисловими протигазами – 5,14 %, респіраторами – 17,2 %.

На об'єктах підвищеної небезпеки поточний запас ЗІЗОД працівників та службовців становить:

хімічно небезпечних об'єктів – 93 %;

радіаційно небезпечних об'єктів – 100 %.

У середньому щороку в області фіксується понад 2000 пожеж в природних екосистемах на площі понад 2500,0 га.

Магістральні газопроводи. По території Дніпропетровської області транспортування газу здійснюється Дніпропетровським та

Криворізьким лінійними виробничими управліннями магістральних газопроводів:

МГ «Шебелинка – Дніпро», протяжністю по території Дніпропетровської області 120 км, з діаметром: 1220 мм, 1020 мм, 820 мм, 720 мм та робочим тиском 55 атм.

МГ «Дніпро – Одеса» Протяжність по території області – 175 км. Газопровід проходить в тринитковому виконанні, діаметром – 1220 мм, 1020, 720 з робочим тиском 35 атм.

МГ «Кременчук – Кривий Ріг» діаметром 1020 мм. Обслуговується Криворізьким лінійним виробничим управлінням магістральних газопроводів, протяжність по Дніпропетровській області – 89 км. Газопровід проходить в одностиковому виконанні з глибиною залягання 1,0 м та робочим тиском 55 атм.

При виникненні аварії на магістральних газопроводах відсутній негативний вплив на об'єкти та населені пункти області (об'єкти та населені пункти не попадають у зону ураження від аварії на магістральних газопроводах).

Продуктопровід «Лисичанськ – Дніпро – Запоріжжя» діаметром 300–350 мм. Продуктопровід проходить в одностиковому виконанні з глибиною залягання 0,7–0,8 м та робочим тиском 42 атм.

Найбільш складна аварійна ситуація може скластися у разі розриву п'яти ниток магістральних газопроводів, які прокладені в одному технічному коридорі, або вибуху на компресорній станції.

При цьому, в радіусі 1 км виникає пожежа, можливі руйнування близько розташованих приміщень. Масштаби втрат та руйнувань будуть залежати від місця аварії на трасі.

Прогноз воєнно- та соціально-політичної обстановки на території України свідчить про те, що на території Дніпропетровської області в наслідок дестабілізації суспільно-політичної обстановки в суміжних державах можливе виникнення неконтрольованих процесів, кризових ситуацій, що в свою чергу може привести до виникнення НС техногенного

та соціально-політичного характеру. Також слід врахувати, що на випадок міждержавного збройного конфлікту ще до початку бойових дій, противник буде намагатися ослабити військово-економічний стан шляхом порушення системи державного значення.

Висновки

Придніпровський промисловий регіон –

один із значимих в забезпеченні функціонування національної економіки держави. Розробка ефективних заходів та забезпечення оперативного реагування на виклики виникнення НС в регіоні необхідне для запобігання їх виникненню, ліквідації та зменшення наслідків при можливому їх виникненні, з урахуванням воєнного стану в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про критичну інфраструктуру». *Відомості Верховної Ради*. 2023. № 5. Ст. 13. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
2. «Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури» : Постанова КМУ від 9 жовтня 2020 р. № 1109. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>
3. «Про затвердження Національного плану захисту та забезпечення безпеки та стійкості критичної інфраструктури» : розпорядження КМУ від 19 вересня 2023 р. № 825-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/825-2023-%D1%80#Text>
4. Суходоля О. М. Безпека і стійкість критичної інфраструктури : мета та зміст освітніх програм. URL: <http://surl.li/gxebnx>

REFERENCES

1. *Zakon Ukrainy "Pro krytychnu infrastrukturu"* [Law of Ukraine "On Critical Infrastructure"]. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady* [Bulletin of the Verkhovna Rada]. 2023, no. 5, Art. 13. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text> (in Ukrainian).
2. *Postanova KМУ vid 9 zhovtnia 2020 r. № 1109 "Deiaki pytannia obiektiv krytychnoi infrastruktury"* [Resolution of the CMU dated October 9, 2020 no. 1109 "Some issues of critical infrastructure facilities"]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text> (in Ukrainian).
3. *Rozporiadzhennia KМУ vid 19 veresnia 2023 r. № 825-r "Pro zatverdzhennia Natsionalnoho planu zakhystu ta zabezpechennia bezpeky ta stiikosti krytychnoi infrastruktury"* [Order of the CMU dated September 19, 2023 no. 825-r "On the approval of the National Plan for the Protection and Ensuring the Safety and Stability of Critical Infrastructure"]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/825-2023-%D1%80#Text> (in Ukrainian).
4. Sukhodolia O.M. *Bezpeka i stiikist krytychnoi infrastruktury : meta ta zmist osvitnikh prohram* [Safety and stability of critical infrastructure : purpose and content of educational programs]. URL: <http://surl.li/gxebnx> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.11.2024.

УДК 69.055:69.003

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.98.1117

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШАБЛОНІВ УПРАВЛІННЯ БУДІВНИЦТВОМ

МЕНЕЙЛЮК О. І.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
НІКІФОРОВ О. Л.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна, e-mail: meneilyk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1007-309X

^{2*} Кафедра технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +38 (066) 33-09-054, e-mail: nikiforov.aleksey@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0001-7002-7055

Анотація. Актуальність роботи. В умовах військової агресії, що триває, необхідна відбудова може реалізовуватися у різноманітному організаційному середовищі, зазвичай сформованому без використання стандартів щодо методів управління. Відповідно, існує необхідність обґрунтування ефективності та запровадження інформаційно-комунікаційної концепції, яка пояснює, яким чином керувати будівництвом, в тому числі за наявності сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Обґрунтування ефективності використання цих інструментів в умовах будівельної галузі України є актуальним завданням, адже дозволить підтвердити можливість підвищення точності та швидкості керівних впливів, зниження витрат на управління і відповідного скорочення тривалості будівництва. **Мета дослідження** – розробка методики обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом шляхом створення відповідної логічної моделі, вибору математичних методів експериментального дослідження та розробки опитувальної анкети. **Методика.** Застосовано методи аналізу та синтезу при аналізі інформаційних джерел, запропоновано використання методів кореляційно-регресійного аналізу, експериментально-статистичного моделювання та методу Монте-Карло при експериментальних дослідженнях. **Результати.** В статті виконано аналіз інформаційних джерел щодо факторів ефективності традиційних і новітніх методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Розроблено наукову гіпотезу методики оцінки ефективності інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом», що об'єднує найбільш ефективні інноваційні та традиційні методи управління. Запропоновано двоетапну схему експериментального дослідження для обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом. Розроблено опитувальну анкету для оцінки скорочення тривалості будівництва від впровадження методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Розробка наукової гіпотези методики оцінки ефективності інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» дозволила запропонувати відповідну двоетапну схему експериментального дослідження.

Ключові слова: шаблон управління будівництвом; опитування; експериментально-статистичне моделювання; кореляційно-регресивний аналіз; метод Монте-Карло

METHODOLOGY DEVELOPMENT FOR EFFICIENCY JUSTIFICATION OF CONSTRUCTION MANAGEMENT TEMPLATES

MENEYLYUK O.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NIKIFOROV O.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Technology of Building Industry, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrikhsona St., Odesa, 65029, Ukraine, e-mail: meneilyk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1007-309X

^{2*} Department of Technology of Building Industry, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrikhsona St., Odesa, 65029, Ukraine, tel. +38 (066) 33-09-054, e-mail: nikiforov.aleksey@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0001-7002-7055

Abstract. The relevance of the work. In the context of ongoing military aggression, the necessary reconstruction can be implemented in a diverse organizational environment, usually formed without the use of management methods standards. Accordingly, there is a need to substantiate the effectiveness and introduce an information-communication concept that explains how to perform construction management, in the presence of modern information-communication technologies. Justification of the effectiveness of these tools utilization in the conditions of Ukraine construction industry is an urgent task, because it will allow to confirm the possibility of increasing the accuracy and speed of managerial influences, reducing management costs and correspondingly reducing the duration of construction. **Purpose.** Development of a methodology for substantiating the effectiveness of construction management templates by creating

an appropriate logical model, choosing mathematical methods for experimental research and developing a survey questionnaire. **Methodology.** The methods of analysis and synthesis are applied in the analysis of information sources, the use of methods of correlation-regression analysis, experimental-statistical modeling and the Monte Carlo method in experimental studies was proposed. **The results.** The article analyzes information sources regarding the effectiveness factors of traditional and modern management methods and information-communication technologies. A scientific hypothesis of the methodology for evaluating the effectiveness of the information-communication concept “construction management template” has been developed, which combines the most effective innovative and traditional management methods. A two-stage scheme of experimental research is proposed to substantiate the effectiveness of construction management templates. A survey questionnaire was developed to assess the reduction of construction duration from the implementation of management methods and information and communication technologies. The development of a scientific hypothesis of the methodology for evaluating the effectiveness of the information-communication concept “construction management template” made it possible to propose a two-stage experimental research scheme.

Keywords: *construction management template; poll; experimental and statistical modeling; correlation-regression analysis; Monte Carlo method*

Вступ. В умовах військової агресії, що триває, необхідна відбудова може реалізовуватися у різноманітному організаційному середовищі, зазвичай сформованому без використання стандартів щодо методів управління: управління проектами, системи управління якістю, наукова організація праці та управління, управління знаннями тощо. Відповідно, існує необхідність обґрунтування ефективності та запровадження інформаційно-комунікаційної концепції, яка б пояснювала, яким чином керувати будівництвом, в тому числі за наявності сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Такою концепцією може стати «шаблон управління будівництвом». Її сутність полягає у використанні інформаційно-комунікаційних моделей у вигляді об'ємних параметричних частин будівлі чи споруди та пов'язаних з ними ресурсних графіків робіт, що використовуються для прийняття та моніторингу планувальних, конструктивних, технологічних, організаційних, експлуатаційних та економічних рішень протягом усього будівельного проекту. Для реалізації цієї концепції передбачено використання найбільш ефективних сучасних та традиційних методів управління та новітнього програмного забезпечення. Обґрунтування ефективності використання цих інструментів в умовах будівельної галузі України є актуальним завданням, адже дозволить підтвердити можливість підвищення точності та швидкості керівних

впливів, зниження витрат на управління і відповідного скорочення тривалості будівництва. Тому ця публікація присвячена розробці методики обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом.

Аналіз публікацій. Розробці інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» присвячено монографію [24]. Відповідно до запропонованого визначення, шаблон управління будівництвом – це інформаційно-комунікаційна модель у вигляді об'ємної параметричної частини будівлі чи споруди та пов'язаного з нею ресурсного графіку робіт. Під об'ємною параметричною частиною мається на увазі 3D-модель будівлі чи споруди; під ресурсним графіком – пов'язаний у часі перелік робіт, оцінки тривалості та вартості якого спираються на необхідні ресурси.

Модель використовується для прийняття та моніторингу планувальних, конструктивних, технологічних, організаційних, експлуатаційних та економічних рішень протягом усього будівельного проекту. В якості методологій управління, покладених в основу концепції «шаблон управління будівництвом», вибрано: принципи системи управління якістю, управління проектами та інжинірингу, управління знаннями, наукова організація праці та управління, інформаційно-комунікаційні технології (головним чином, будівельне інформаційне моделювання).

Використання інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» в умовах будівельної галузі України є актуальним завданням, адже дозволить підвищити точність та швидкість керівних впливів, знизити витрати на управління і відповідно скоротити тривалість будівництва.

Дослідження, присвячені визначенню ефективності впровадження системи управління якістю, включають в себе [15; 16]. В якості факторів ефективності, що аналізуються, взято до уваги похідні від принципів системи, викладених в [27], що може бути недостатньо достовірним при опитуванні фахівців, що слабо знайомі з методологією, яка розглядається.

Публікації щодо визначення результатів впровадження методології управління проектами [2; 6; 8; 10; 21], в якості факторів ефективності розглядають як області знань відповідно до РМВоК [25], так і конкретні інструменти та результати їх використання. Відповідно, для більшої конкретизації опитування та підвищення достовірності досліджень, доцільно в якості факторів ефективності вибирати інструменти та визначні риси управління проектами.

Управління знаннями – управління інформаційними ресурсами, якими володіє людина чи організація, що дозволяє приймати вірні рішення та робити результативні дії у тих чи інших умовах. В дослідженнях ефективності цієї методології [1; 3–4; 9; 18] до основних факторів відносять матеріальну базу інформаційних технологій та фактори процесу управління знаннями. Так як саме останні є визначальними в рамках інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом», доцільно в подальших дослідженнях аналізувати їхній вплив.

Наукова організація праці і управління (НОПіУ) бере початок від розробок Генрі Форда. В сучасних зарубіжних джерелах аналізується вплив факторів підвищення продуктивності праці [7; 12–13; 19–20; 23]. В Україні цій методології теж приділяється увага, тому для визначення ефективності

доцільно включати фактори, що характеризують саме визначні риси вітчизняної школи НОПіУ.

Серед найбільш визначальної інформаційно-комунікаційної технології при управлінні будівництвом варто відзначити будівельне інформаційне моделювання (BIM). В дослідженнях, присвячених вимірам результатів впровадження BIM [5; 11; 14; 17; 22]. Увагу приділено як визначальним рисам цієї технології, та і похідним від її використання. Відповідно, дослідження першої групи факторів представляється більш доцільним та достовірним.

В цілому, аналіз інформаційних джерел показав актуальність оцінки ефективності впливу методів управління на тривалість будівництва. Адже попри велику кількість проведених досліджень, жодне з них не оцінює сумісний вплив методів управління на основні показники ефективності. Це можливо тільки в рамках взаємоузгодженої інформаційно-комунікаційної концепції. Крім того, проведений пошук показав відсутність оцінки впливу методів управління на тривалість будівництва в Україні та відсутність досліджень з моделювання їхнього впливу на показники операційної діяльності будівельного підприємства.

Мета дослідження. Розробка методики обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом шляхом створення відповідної логічної моделі, вибору математичних методів експериментального дослідження та розробки опитувальної анкети. Для досягнення зазначеної мети вирішені наступні завдання:

1. Аналіз інформаційних джерел щодо факторів ефективності традиційних і новітніх методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій.
2. Розробка наукової гіпотези методики оцінки ефективності інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом».
3. Розробка двоетапної схеми експериментального дослідження для

обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом.

4. Розробка опитувальної анкети з оцінки скорочення тривалості будівництва від впровадження методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій.

Методика. Застосовано методи аналізу та синтезу при аналізі інформаційних джерел, запропоновано використання методів кореляційно-регресійного аналізу, експериментально-статистичного моделювання та методу Монте-Карло при експериментальних дослідженнях.

Наукова гіпотеза, покладена в основу розробленої методики. В якості робочої

гіпотези зроблене наступне припущення. Для ліквідації невизначеності організаційного середовища відбудови від наслідків військової агресії потрібна суттєво нова бізнес-модель, що об'єднувала б принципи системи управління якістю, управління проектами, наукової організації праці та управління в будівництві і можливості сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Такою бізнес-моделлю може стати метод управління будівельним виробництвом із застосуванням нової інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» (рис. 1).



Рис. 1. Ефективність інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» [24]

Використання новітньої інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» враховує сучасне програмне забезпечення, найбільш ефективні інноваційні та традиційні методи управління: система управління якістю; управління проектами; будівельне інформаційне моделювання (Building Information Modeling – BIM); найбільш ефективні традиційні методи наукової організації праці та управління в будівництві; характерні особливості будівельної галузі (технологічна та інформаційна складність; проектно-

орієнтованість і різноманітність умов реалізації будівельних проектів, значна кількість учасників і т. д.).

Сутність нової концепції полягає у: виконанні інвестиційно-будівельного проекту від створення концепції об'єкта до здачі його в експлуатацію; використанні шаблонів управління будівництвом як основи управління підприємством; скороченні проміжних ієрархічних ланок при організації та контролі виробництва; створенні додаткових контурів контролю на додачу до традиційної ієрархічної структури управління в будівництві: управління

знаннями, управління проектами, фінансового менеджменту та служб аудиту (внутрішніх та зовнішніх).

Вказані особливості можуть підвищити оперативність та точність управління, зменшивши тим самим тривалість портфелю проектів. Це має призвести до підвищення економічної ефективності інвестиційно-будівельних проектів: підвищення операційної рентабельності, оборотності капітальних вкладень, зменшення дисконтованих витрат.

Обґрунтування ефективності нової інформаційно-комунікаційної концепції можна зробити наступним чином.

1. Розробити теоретичні методи та моделі управління у складі інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом».

2. Запропонувати теоретичні засади та розробити модель операційної діяльності підприємства повного інвестиційно-будівельного циклу із використанням шаблонів управління будівництвом.

3. Провести статистичне дослідження впливу сучасних та традиційних методів управління на тривалість будівництва.

Отримати результати експериментально-статистичного моделювання показників операційної діяльності підприємства повного інвестиційно-будівельного циклу від зменшення тривалості будівництва внаслідок впровадження методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Ітераційне моделювання сукупності інвестиційно-будівельних проектів з використанням методу Монте-Карло та експериментально-статистичного моделювання дозволить із заданою ймовірністю розрахувати економічний ефект від запровадження нової концепції: підвищення економічної ефективності інвестиційно-будівельних проектів: підвищення операційної рентабельності, оборотності капітальних вкладень, зменшення дисконтованих витрат.

Двоетапна структурно-логічна схема експериментальних досліджень. Дослідження ефективності методів

управління має складності, адже потрібно дослідити взаємозв'язки управляючої підсистеми на відміну від дослідження підсистеми, що управляється, яка зазвичай має фізичне уособлення або зримий результат діяльності. Відповідно, для виділення показників ефективності саме методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій треба відфільтрувати вплив результативності та ефективності безпосередніх виконавців будівельних процесів. Крім того, великою проблемою є наявність зовнішніх факторів, що можуть негативно вплинути на результати інвестиційно-будівельного проекту навіть при його ефективному керівництві: нестабільна політична обстановка, коливання ринків будівельної продукції, непередбачувані зміни законодавства, несприятливі погодні умови тощо. Таким чином, неможливо достовірно зробити висновок про доцільність впровадження, просто прямо вимірявши результати та ефективність інвестиційно-будівельного проекту та порівнявши їх зі ступенем впровадження методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Саме через це запропонована двоетапна схема експериментальних досліджень, що передбачає непрямий вимір ефективності впровадження відповідних методів та технологій (рис. 2):

1. На першому етапі експерименту передбачається вимірювання впливу методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій на тривалість будівництва шляхом опитування фахівців будівельної галузі. Приймається в якості аксіоми, що впровадження відповідних методів та технологій дозволить підвищити точність та швидкість керівних впливів (або знизити невизначеність при видачі завдань та контролі процесів), знизити витрати на управління, тим самим вплинути на тривалість кожного з процесів інвестиційно-будівельного проекту. Для більш точного опитування опрацьовано інформаційні джерела, знайдено фактори ефективності відповідних методів та технологій. В якості математичного методу прийнятий

кореляційно-регресійний аналіз впливу статистичних даних із заданим довірчим методів управління на тривалість інтервалом та скласти відповідні залежності будівництва, що дозволить обробити масив впливу.

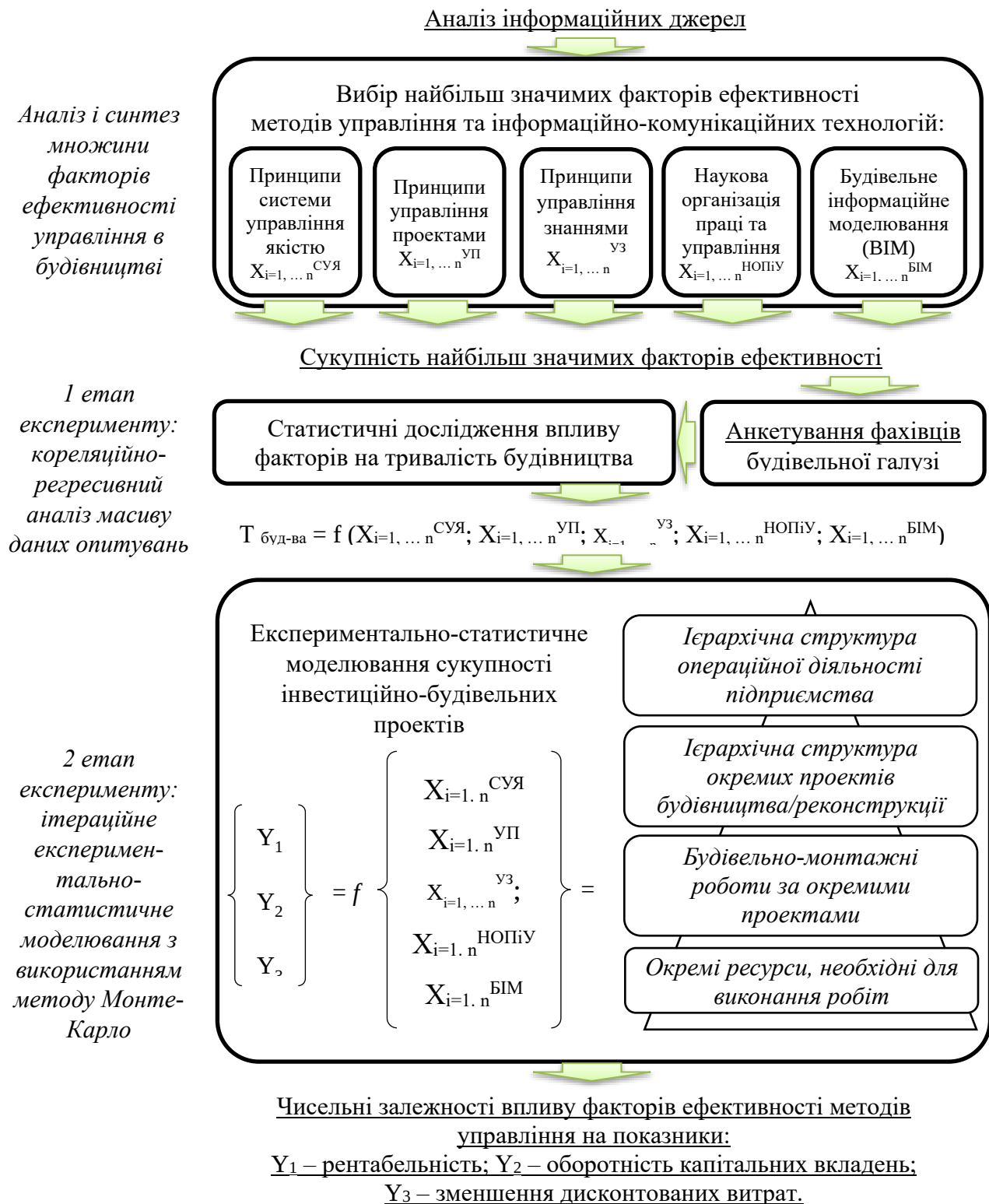


Рис. 2. Двоетапна структурно-логічна схема експериментальних досліджень (курсивом позначені методи досліджень, підкресленим – проміжні результати досліджень, рамкою – етапи досліджень)

2. На другому етапі експерименту планується дослідити показники інвестиційно-будівельних проектів, з урахуванням залежності впливу факторів ефективності методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Береться до уваги, що вплив відповідних методів та технологій на результативність та ефективність проектів має ймовірнісну природу. Відповідно, прийнято доповнити методику експериментально-статистичного моделювання ітераційним моделюванням з використанням методу Монте-Карло, що дозволить врахувати нечітку специфіку об'єкту експерименту.

Відповідно, в якості об'єкта експериментально-статистичного моделювання розглядається підсистема, що управляється. В цьому дослідженні – операційна діяльність як сукупність графіків інвестиційно-будівельних проектів. Такий підхід має принаймні два значних доповнення:

- Визначення закономірності впливу методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій на тривалість будівництва на першому етапі дозволяє вносити зміни в досліджуваний об'єкт за обґрунтованим законом, тим самим моделюючи вплив відповідних методів та технологій без врахування супутніх факторів.

- Ітераційне моделювання з використанням методу Монте-Карло дозволяє врахувати ймовірнісний характер впливу управлінських дій на результат інвестиційно-будівельного проекту. Таким чином враховуються психоемоційні чинники управління.

Розробка опитувальної анкети першого етапу дослідження. Опитувальна анкета доступна за інтернет-посиланням [26], а також за QR-кодом для зручності зчитування смартфоном (рис. 3). Кваліфіковані фахівці будівельної галузі заохочуються до висвітлення в даній анкеті свого досвіду щодо впровадження в Україні новітніх та традиційних методів управління в будівництві. В якості подяки за проходження опитування автори

зобов'язуються надіслати його результати усім учасникам після статистичної обробки, а також надати наявні наукові результати для необмеженого використання та розповсюдження: монографію «Шаблон управління будівництвом – нова інформаційно-комунікаційна концепція» [24].

Участь у даному дослідженні дозволить об'єднати думки експертів галузі у взаємно інтегрованій інформаційно-комунікаційній концепції – «шаблон управління будівництвом», – що дасть можливість сформувати засади для зменшення тривалості будівництва, збільшення системності та культури управління в будівництві та, за достатньої підтримки, сформувати напрямок подальшого розвитку державної політики в галузі.

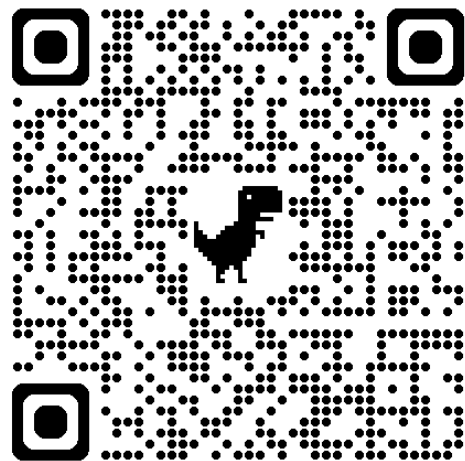


Рис. 3. Посилання на опитувальну анкету з дослідження ефективності впровадження в Україні сучасних методів управління в будівництві [26]

Опитувальна анкета з дослідження ефективності впровадження в Україні сучасних методів управління в будівництві (рис. 3) складається з наступних блоків:

- Розділ залучення кваліфікованих фахівців будівельної галузі.
- Розділ «Вплив впровадження наукової організації праці та управління на тривалість будівництва».
- Розділ «Вплив впровадження управління проектами на тривалість будівництва».

- Розділ «Вплив впровадження управління системи управління якістю на тривалість будівництва».
- Розділ «Вплив впровадження управління знаннями на тривалість будівництва».
- Розділ «Вплив впровадження будівельного інформаційного моделювання (BIM) на тривалість будівництва».
- Розділ «Синергічний вплив впровадження методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій».
- Розділ «Дані про професійний досвід респондента».
- Розділ-подяка.

Опитувальна анкета з дослідження ефективності впровадження в Україні новітніх та традиційних методів управління в будівництві розроблена з наступними передумовами:

- Анкета розроблена на основі конкретних практик та інструментів, які характеризують ступінь впровадження тих чи інших методів управління.
- Ці практики та інструменти визначаються шляхом аналізу попередніх досліджень по темі ефективності впровадження методів управління, але можуть бути доповненими за необхідності відповідно до стандартів з того чи іншого методу.
- В рамках опитування необхідно встановити значення скорочення тривалості будівництва порівняно з ситуацією, при якій застосування практик та інструментів методів управління не відбувалося. В якості джерела даних пропонується оцінити власний досвід респондентів. Це дозволить створити формули залежності тривалості будівництва від ступеню впровадження того чи іншого методу управління. Такі формули в подальшому можуть бути використані при ітераційному моделюванні будівельних проектів, кореляційно-регресійний аналіз якого із застосуванням методу Монте-Карло дозволяє більш достовірно оцінити скорочення тривалості будівництва при впровадженні комплексу методів управління – шаблону управління будівництвом.

- Достовірність анкетування забезпечується за трьома напрямками:

- Перед блоком питань з оцінки впливу впровадження того чи іншого методу управління на тривалість будівництва подана коротка характеристика методу з метою запобігання плутанини.
- Кожен блок з оцінки методу управління закінчується самооцінкою ступеню ознайомленості респондента з принципами того чи іншого методу управління.
- Останнім блоком анкети є оцінка досвіду та професійної орієнтації респондента.

Висновки

1. Аналіз інформаційних джерел дозволив вибрати найбільш значущі фактори ефективності методів управління для оцінки їхнього впливу на тривалість будівництва.

2. Розробка наукової гіпотези оцінки ефективності інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» дозволила запропонувати двоетапну схему експериментального дослідження.

3. Для забезпечення достовірності експериментального дослідження з обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом використовуються наступні статистичні методи:

- кореляційно-регресійний аналіз залежностей впливу методів управління на тривалість будівництва – на першому етапі;
- експериментально-статистичне моделювання показників операційної діяльності будівельного підприємства сумісно з методом Монте-Карло – на другому етапі дослідження.

4. Опитувальна анкета з оцінки скорочення тривалості будівництва від впровадження новітніх та традиційних методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій оцінює складові інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом». Анкета дозволяє охарактеризувати ступінь ознайомленості респондента з тим чи іншим методом та їхній професійний досвід.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abd Rahman A. et al. Training and organizational effectiveness : moderating role of knowledge management process. *European Journal of Training and Development*. 2013. Vol. 37, № 5. Pp. 472–488. URL: <http://doi.org/10.1108/03090591311327295>
2. Al-Hajj A., Zraunig M. The impact of project management implementation on the successful completion of projects in construction. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. 2018. Vol. 9, № 1. Pp. 21–27. URL: <https://doi.org/10.18178/ijimt.2018.9.1.781>
3. Benbya H., Belbaly N. A. Mechanisms for knowledge management systems effectiveness : an exploratory analysis. *Knowledge and Process Management*. 2005. Vol. 12, № 3. Pp. 203–216. URL: <https://doi.org/10.1002/kpm.231>
4. Bharadwaj S. S., Chauhan S., Raman A. Impact of knowledge management capabilities on knowledge management effectiveness in Indian organizations. *Vikalpa*. 2015. Vol. 40, № 4. Pp. 421–434. URL: <http://doi.org/10.1177/0256090915613572>
5. Cao D., Li H., Wang G. Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance : a resource dependence theory perspective. *Frontiers of Engineering Management*. 2017. Vol. 4, № 1. Pp. 20–34. URL: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017010>
6. Chou J. S., Yang J. G. Project management knowledge and effects on construction project outcomes : an empirical study. *Project Management Journal*. 2012. Vol. 43, № 5. Pp. 47–67. URL: <https://doi.org/10.1002/pmj.21293>
7. Durdyyev S., Ismail S., Kandymov N. Structural equation model of the factors affecting construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018. Vol. 144, № 4. Pp. 04018007. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001452)
8. Gwaya A. O., Masu S. M., Wanyona G. Development of appropriate project management factors for the construction industry in Kenya. *International Journal of Soft Computing and Engineering*. 2014. Vol. 4, № 1. Pp. 70–76.
9. Jennex M. E., Olfman L. Assessing knowledge management success/effectiveness models. *Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences-2004. IEEE*. 2004. Pp. 10. URL: <http://doi.org/10.1109/HICSS.2004.1265571>
10. Kaming P. F. et al. Factors influencing construction time and cost overruns on high-rise projects in Indonesia. *Construction Management & Economics*. 1997. Vol. 15, № 1. Pp. 83–94. URL: <https://doi.org/10.1080/014461997373132>
11. Maliha M. N., Tayeh B. A., Abu Aisheh Y. I. Building information modeling (BIM) in enhancing the applying of knowledge areas in the architecture, engineering and construction (AEC) industry. *The Open Civil Engineering Journal*. 2020. № 1. URL: <https://doi.org/10.2174/1874149502014010388>
12. McDonald D. F., Zack J. G. Estimating lost labor productivity in construction claims. *AACE International Recommended Practice No. 25R*. 2004. Vol. 3. URL: <https://doi.org/10.1002/pmj.21293>
13. Nasirzadeh F., Nojedehe P. Dynamic modeling of labor productivity in construction projects. *International Journal of Project Management*. 2013. Vol. 31, № 6. Pp. 903–911.
14. Newton K., Chileshe N. Awareness, usage and benefits of building information modelling (BIM) adoption – the case of the South Australian construction organisations. *Management*. 2012. Vol. 3. Pp. 12. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2352.3363>
15. Neyestani B. Effectiveness of quality management system (QMS) on construction projects. *Available at SSRN* 2947712. 2016. URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.290272>
16. Panuwatwanich K., Nguyen T. T. Influence of total quality management on performance of Vietnamese construction firms. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 182. Pp. 548–555. URL: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.151>
17. Sarvari H. et al. Evaluating the impact of building information modeling (BIM) on mass house building projects. *Buildings*. 2020. Vol. 10, № 2. Pp. 35. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings10020035>
18. Smits M., de Moor A. Measuring knowledge management effectiveness in communities of practice. *Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences-2004. IEEE*. 2004. Pp. 9. URL: <http://doi.org/10.1109/HICSS.2004.1265570>
19. Soekiman A. et al. Factors relating to labor productivity affecting the project schedule performance in Indonesia. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14. Pp. 865–873. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.110>
20. Thomas H. R., Napolitan C. L. Quantitative effects of construction changes on labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1995. Vol. 121, № 3. Pp. 290–296.
21. Unegbu H. C. O., Yawas D. S., Dan-Asabe B. An investigation of the relationship between project performance measures and project management practices of construction projects for the construction industry in Nigeria. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2022. Vol. 34, № 4. Pp. 240–249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.001>

22. Wong J. H., Rashidi A., Arashpour M. Evaluating the impact of building information modeling on the labor productivity of construction projects in Malaysia. *Buildings*. 2020. Vol. 10, № 4. Pp. 66. URL: <http://doi.org/10.3390/buildings10040066>
23. Yi W., Chan A. P. C. Critical review of labor productivity research in construction journals. *Journal of Management in Engineering*. 2014. Vol. 30, № 2. Pp. 214–225. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000194)
24. Ковров А. В., Меньлюк О. І., Нікіфоров О. Л. Шаблон управління будівництвом – нова інформаційно-комунікаційна концепція. Одеса : ОДАБА, 2021. 165 с.
25. Настанова до зводу Знань з управління проектами (настанова РМВОК) : 7-е вид. та стандарт з управління проектами. Переклад з англ. Савін А. А. та ін. Пенсильванія : Інститут проєктного менеджменту, 2021. 370 с. URL: <https://res2.weblium.site/res/65b233680835c5000feec557/65ca57d1d6ab06000f91bd67>
26. Меньлюк О. І., Нікіфоров О. Л. Опитувальна анкета з дослідження ефективності впровадження в Україні сучасних методів управління в будівництві. Одеса : ОДАБА, 2024. URL: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdXKUfzGhxAa58Lbe7-xt_h82nnaniTAS5_3xnr7YLgu8pMg/viewform
27. ДСТУ ISO 9004:2012. Управління задля досягнення сталого успіху організації. Підхід на основі управління якістю (ISO 9004:2009, IDT). [Чинний від 2012–11–28]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013. 45 с.

REFERENCES

1. Abd Rahman A. et al. Training and organizational effectiveness : moderating role of knowledge management process. *European Journal of Training and Development*. 2013, vol. 37, no. 5, pp. 472–488. URL: <http://doi.org/10.1108/03090591311327295>
2. Al-Hajj A. and Zraunig M. The impact of project management implementation on the successful completion of projects in construction. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. 2018, vol. 9, no. 1, pp. 21–27. URL: <https://doi.org/10.18178/ijimt.2018.9.1.781>
3. Benbya H. and Belbaly N.A. Mechanisms for knowledge management systems effectiveness : an exploratory analysis. *Knowledge and Process Management*. 2005, vol. 12, no. 3, pp. 203–216. URL: <https://doi.org/10.1002/kpm.231>
4. Bharadwaj S.S., Chauhan S. and Raman A. Impact of knowledge management capabilities on knowledge management effectiveness in Indian organizations. *Vikalpa*. 2015, vol. 40, no. 4, pp. 421–434. URL: <http://doi.org/10.1177/0256090915613572>
5. Cao D., Li H. and Wang G. Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance : a resource dependence theory perspective. *Frontiers of Engineering Management*. 2017, vol. 4, no. 1, pp. 20–34. URL: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017010>
6. Chou J.S. and Yang J.G. Project management knowledge and effects on construction project outcomes : an empirical study. *Project Management Journal*. 2012, vol. 43, no. 5, pp. 47–67. URL: <https://doi.org/10.1002/pmj.21293>
7. Durdyev S., Ismail S. and Kandymov N. Structural equation model of the factors affecting construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018, vol. 144, no. 4, pp. 04018007. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001452)
8. Gwaya A.O., Masu S.M. and Wanyona G. Development of appropriate project management factors for the construction industry in Kenya. *International Journal of Soft Computing and Engineering*. 2014, vol. 4, no. 1, pp. 70–76.
9. Jennex M.E. and Olfman L. Assessing knowledge management success/effectiveness models. *Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences-2004*. IEEE. 2004, pp. 10. URL: <http://doi.org/10.1109/HICSS.2004.1265571>
10. Kaming P.F. et al. Factors influencing construction time and cost overruns on high-rise projects in Indonesia. *Construction Management & Economics*. 1997, vol. 15, no. 1, pp. 83–94. URL: <https://doi.org/10.1080/014461997373132>
11. Maliha M.N., Tayeh B.A. and Abu Aisheh Y.I. Building information modeling (BIM) in enhancing the applying of knowledge areas in the architecture, engineering and construction (AEC) industry. *The Open Civil Engineering Journal*. 2020, no. 1. URL: <https://doi.org/10.2174/1874149502014010388>
12. McDonald D.F. and Zack J.G. Estimating lost labor productivity in construction claims. *AACE International Recommended Practice No. 25R*, 2004, vol. 3. URL: <https://doi.org/10.1002/pmj.21293>
13. Nasirzadeh F. and Nojedehe P. Dynamic modeling of labor productivity in construction projects. *International Journal of Project Management*. 2013, vol. 31, no. 6, pp. 903–911.
14. Newton K. and Chileshe N. Awareness, usage and benefits of building information modelling (BIM) adoption – the case of the South Australian construction organisations. *Management*. 2012, vol. 3, pp. 12. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2352.3363>
15. Neyestani B. Effectiveness of quality management system (QMS) on construction projects. Available at SSRN 2947712. 2016. URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.290272>

16. Panuwatwanich K. and Nguyen T.T. Influence of total quality management on performance of Vietnamese construction firms. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 182, pp. 548–555. URL: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.151>
17. Sarvari H. et al. Evaluating the impact of building information modeling (BIM) on mass house building projects. *Buildings*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 35. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings10020035>
18. Smits M. and de Moor A. Measuring knowledge management effectiveness in communities of practice. *Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences-2004*. IEEE. 2004, pp. 9. URL: <http://doi.org/10.1109/HICSS.2004.1265570>
19. Soekiman A. et al. Factors relating to labor productivity affecting the project schedule performance in Indonesia. *Procedia Engineering*. 2011, vol. 14, pp. 865–873. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.110>
20. Thomas H.R. and Napolitan C.L. Quantitative effects of construction changes on labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1995, vol. 121, no. 3, pp. 290–296.
21. Unegbu H.C.O., Yawas D.S. and Dan-Asabe B. An investigation of the relationship between project performance measures and project management practices of construction projects for the construction industry in Nigeria. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2022, vol. 34, no. 4, pp. 240–249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.001>
22. Wong J.H., Rashidi A. and Arashpour M. Evaluating the impact of building information modeling on the labor productivity of construction projects in Malaysia. *Buildings*. 2020, vol. 10, no. 4, pp. 66. URL: <http://doi.org/10.3390/buildings10040066>
23. Yi W. and Chan A.P.C. Critical review of labor productivity research in construction journals. *Journal of Management in Engineering*. 2014, vol. 30, no. 2, pp. 214–225. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000194)
24. Kovrov A.V., Meneiliuk O.I. and Nikiforov O.L. *Shablon upravlinnia budivnytstvom – nova informatsiino-komunikatsiina kontseptsiiia* [Construction management template – a new information and communication concept]. Odessa : ODABA Publ., 2021, 165 p. (in Ukrainian).
25. *Nastanova do zvodu Znan z upravlinnia proiektamy (nastanova PMBOK) : 7-e vydannia ta standart z upravlinnia proiektamy* [A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) : 7th edition of the project management standard]. Translation from English: Savin A.A. and oth. Pennsylvania : Institute of Project Management, 2021, 370 p. URL: <https://res2.weblium.site/res/65b233680835c5000feec557/65ca57d1d6ab06000f91bd67> (in Ukrainian).
26. Meneiliuk O.I. and Nikiforov O.L. *Opytuvalna anketa z doslidzhennia efektyvnosti vprovadzhennia v Ukraini suchasnykh metodiv upravlinnia v budivnytstvi* [An experimental questionnaire to study the effectiveness of current methods of management in everyday life in Ukraine]. Odessa : ODABA Publ., 2024. URL: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdXKUfzGhxAa58Lbe7-xt_h82nnaniTAS5_3xnrv7YLGu8pMg/viewform (in Ukrainian).
27. *DSTU ISO 9004:2012. Upravlinnya zadlya dosyahnennya staloho uspikhu orhanizatsiyi. Pidkhid na osnovi upravlinnya yakistyu (ISO 9004:2009, IDT)* [DSTU ISO 9004: 2012 Management to achieve sustainable success of the organization. Quality management approach (ISO 9004: 2009, IDT): Valid from 2012-11-28]. Kyiv : Minekonomrozvytku Ukrayiny Publ., 2013, 45 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.10.2024.

УДК 69.059.6

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.27124.109.1118

ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ АВАРІЙНО-ДЕМОНТАЖНИХ РОБІТ НА ПРОМИСЛОВОМУ ОБ'ЄКТІ, ЗРУЙНОВАНОМУ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

НАУМОВ В. О.^{1*}, *доктор філософії*,
БІЛОКОНЬ А. І.², *докт. техн. наук, проф.*

^{1*} Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 380-94-39, e-mail: naumov.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0355-6472

² Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-76, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7332-1177

Анотація. У статті розглянуто технологічну послідовність виконання аварійно-демонтажних робіт на промисловому об'єкті, зруйнованому внаслідок ракетної атаки. Описано початкові етапи розчищення зони виконання робіт, що включали демонтаж зруйнованих конструкцій та підготовку території для встановлення вантажопідіймальних кранів. Основну увагу приділено використанню будівельних екскаваторів з різними навісними пристроями для виконання демонтажу, а також можливостям застосування екскаваторів з подовженою стрілою для безпечного виконання робіт на значній висоті. Розглянуто обмеження використання такої техніки у конкретних умовах та описано розроблену схему демонтажу за допомогою подовжувача стріли екскаватора. Особливу увагу приділено організації демонтажних робіт на ділянках, що знаходяться поза зоною досягнення кранів. Описано технологію застосування спеціалізованих візків для переміщення конструкцій, які демонтуються, та їх транспортування в зону роботи кранів. Наведено послідовність операцій з демонтажу аварійних панелей за допомогою підвісних платформ і механізмів стропування. Результати впровадження зазначених технологій дозволили підвищити ефективність використання будівельної техніки та забезпечити безпеку виконання робіт. У статті продемонстровано інноваційні рішення для виконання демонтажних робіт на промислових об'єктах, пошкоджених внаслідок бойових дій. Описані технології можуть бути застосовані для широкого спектру подібних об'єктів з урахуванням їх технічного стану та особливостей навколишнього середовища будівельного майданчика. **Мета дослідження:** розробити та обґрунтувати ефективні технологічні рішення для організації демонтажних робіт на промислових об'єктах, пошкоджених внаслідок бойових дій, з використанням сучасних методів автоматизації та цифрових технологій для оптимізації процесу вибору відповідних методів демонтажу. **Предмет дослідження:** технологічні процеси та засоби для виконання аварійно-демонтажних робіт на пошкоджених промислових об'єктах, зокрема методи підвищення ефективності та безпеки виконання робіт. **Об'єкт дослідження:** пошкоджені промислові об'єкти, які потребують демонтажу або реконструкції в умовах обмеженого доступу та підвищеної небезпеки, спричиненої воєнними діями.

Ключові слова: *демонтажні роботи; промислові об'єкти; ракети; руйнування; екскаватори з подовженою стрілою; технологічні рішення; безпека; цифрові технології; автоматизація*

ORGANIZATION OF EMERGENCY DEMOLITION WORKS AT AN INDUSTRIAL FACILITY DESTROYED DUE TO MILITARY ACTIONS

NAUMOV V.O.^{1*}, *PhD.*,
BILOKON A.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Construction Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 380-94-39, e-mail: naumov.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0355-6472

² Department of Construction Production Technology, Ukrainian State University of Science and Technology, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-76, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7332-1177

Abstract. This article examines the technological sequence of emergency demolition works at an industrial facility destroyed by a missile attack. The initial stages of clearing the work area, including the dismantling of destroyed structures and preparing the site for crane installation, are described. Particular attention is given to the use of construction excavators with various attachments for demolition and the potential of long-reach excavators for safe operations at significant heights. The limitations of such equipment in specific conditions are considered, and a developed demolition scheme using a boom extension for excavators is described. Special attention is devoted to the

organization of demolition work in areas beyond the reach of cranes. The technology of using specialized trolleys for moving dismantled structures and transporting them to the crane operation zone is described. The sequence of operations for dismantling hazardous panels using suspended platforms and rigging mechanisms is provided. The implementation of these technologies resulted in improved construction equipment efficiency and ensured safety during operations. The article demonstrates innovative solutions for performing demolition works at industrial facilities damaged by military actions. The described technologies can be applied to a wide range of similar facilities, considering their technical condition and the specific conditions of the construction site environment. **Purpose of the study.** To develop and substantiate effective technological solutions for organizing demolition works at industrial facilities damaged as a result of military actions, using modern automation methods and digital technologies to optimize the process of selecting appropriate demolition methods. **Subject of the study.** Technological processes and tools for carrying out emergency demolition works at damaged industrial facilities, with a focus on methods for improving work efficiency and safety. **Object of the study.** Damaged industrial facilities that require demolition or reconstruction under conditions of limited access and heightened danger caused by military actions.

Keywords: demolition works; industrial facilities; missiles; destruction; long-reach excavators; technological solutions; safety; digital technologies; automation

Постановка проблеми. Для відновлення функціонування цеху постала необхідність розробити виконання демонтажно-відновлювальних робіт несучих та огорожувальних будівельних конструкцій. Будівля промислового призначення отримала загрозливі руйнування внаслідок ракетного удару по потужностям цеху в кінці 2022 року. Наслідки пошкоджень представлені на (рис. 1).



Рис. 1. Характер руйнувань об'єкту

Дані про об'єкт. Характеристики конструктивного та об'єктно-планувального рішення об'єкта представлено в таблиці 1.

Існуюче покриття будівлі виконано з ребристих збірних залізобетонних плит розміром 3×6 м, поверх яких укладено утеплювач 80 мм, цементна стяжка 20 мм та 4 шари руберойду на бітумній мастиці. Плити покриття приварені до ферм у трьох точках. Будівля, що демонтується умовно розділена на 6 ділянок (рис. 2). На котрі може бути розчленовано об'єкт за умови реконструкції.

Таблиця 1

Характеристики об'єкту

Тип параметру	Значення
Тип будівлі	Промислова
Кількість прольотів	4
Довжина кожного прольоту	30 м
Загальна довжина	120 м
Кількість мостових кранів в кожному прольоті	2
Вантажопід'ємність внутрішньоцехових кранів	12 т 20 т
Розмір ділянки, що реконструюється в довжину	236 м
Крок колон (основний):	12м
Крок колон (окремі ділянки з кроком):	6 м 18 м 24 м, 36 м
Рік введення в експлуатацію	1961
Несучі конструкції	залізобетонні колони
Конструкція перекриття	ферми, металеві в осях 78–48 залізобетонні в осях 48–37

Дані обстеження об'єкту (стану конструкцій; внутрішньо цехових і внутрішньо-майданчикових транспортних засобів, інженерних комунікацій, обладнання та інших мереж, умов виробництва та демонтажних робіт показало:

Майданчик, на якому будуть виконуватися аварійно-демонтажні роботи по відновленню роботи об'єкта, характеризується високою щільністю забудови існуючими промисловими будівлями, спорудами, інженерними мережами та комунікаціями. Всі роботи з демонтажу конструкцій, необхідно буде виконувати в умовах діючого підприємства. Протягом виконання робіт зберігається

існуюча технологічна схема руху внутрішнього технологічного транспорту. Таким чином виконання демонтажних та будівельно-монтажних робіт необхідно

узгоджувати з діючим виробництвом, що суттєво впливає на прийняття організаційно-технологічних рішень та на темпи демонтажно-відновлювальних робіт.

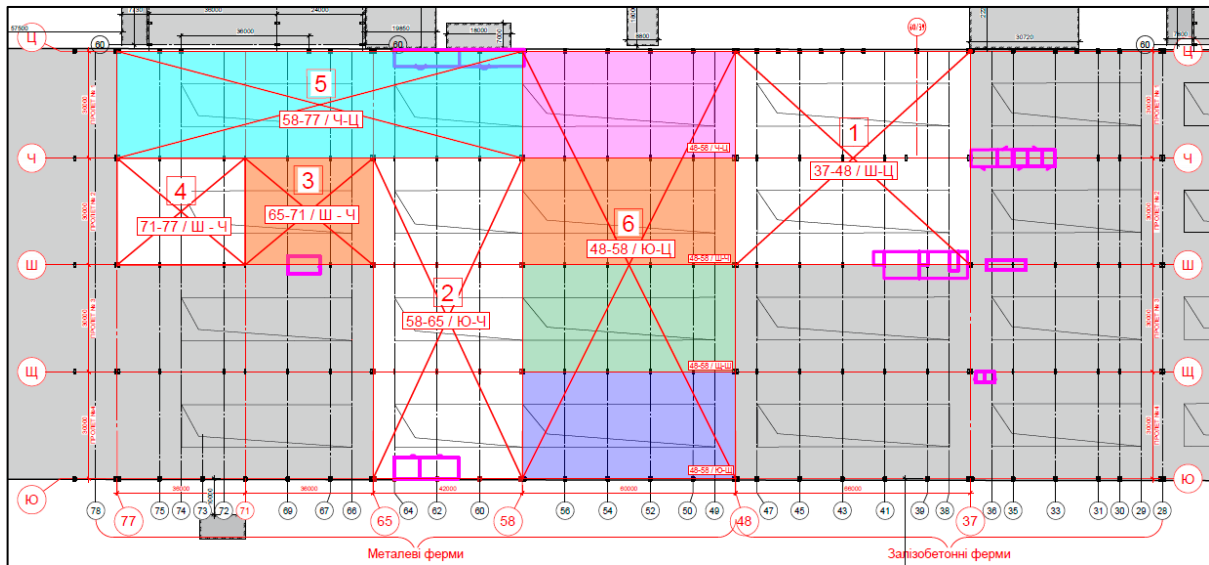


Рис. 2. Компонувальні рішення будівлі, що реконструюється (поділена на ділянки)

Для усунення аварійного стану і відновлення роботи цеху ситуація вимагає від нас оперативно оцінити технічний стан конструкцій та ступінь загрози, обсяги відновлювальних робіт, зону руйнування і демонтажу. Прийняти відповідні технічні рішення, щодо схем виконання робіт.

Виконати комплекс аварійно-демонтажних робіт у стислі терміни та за умов безпеки робітників.

Аналіз останніх публікацій за темою дослідження. Останні літературні джерела за темою дослідження показують стійку тенденцію до так званого «зеленого демонтажу» та переробки матеріалів, що утворилися в наслідок демонтажу та руйнування конструкцій. Але зважаючи на специфіку демонтажу в аварійних ситуаціях [1].

Так у статті [2] описується методика розробки плану демонтажу та демонтажу з мінімізацією викидів CO₂. Розглядаються ключові принципи колообігу, методологія вибору матеріалів, які можна повторно використовувати, та використання інноваційних технологій для зменшення кількості відходів. Автори показують, що застосування цієї методики дозволяє знизити кількість відходів від демонтажу будівель та споруд, зменшити витрати на сортування та переробку відходів, а також знизити викиди CO₂ під час демонтажу.

В статті наводяться приклади успішної реалізації даної методики на практиці. За тією ж стратегією описано дії у статті [3]. Автори описують нові технології демонтажу бетонних конструкцій, які використовують звукознімні хімічні агенти з метою зменшення впливу демонтажних робіт на довкілля та здоров'я людей. У статті наведено основні компоненти цих засобів та їх вплив на процес демонтажу, а також представлено систему оцінки шумового впливу цих технологій на довкілля. Дослідження показали, що використання звукознімних хімічних агентів може допомогти зменшити вібрації та шум, що виникають під час демонтажних робіт, а також зменшити кількість пилу та інших шкідливих викидів. Система оцінки впливу на довкілля дозволяє оцінити ефективність застосування цих технологій та підібрати оптимальний варіант демонтажу з урахуванням екологічних та економічних показників. Стаття [4] є дослідженням з розуміння та пояснення схем дій демонтажу в містах США та Німеччини, в статті [9] показані рішення, що базуються на вже виконаних проектах в Україні. Дослідження [4] базується на аналізі демонтажу в 24 містах США та Німеччини, де використовувалися дані з різних джерел. Автори виявили, що схеми дій демонтажу значно відрізняються між США та Німеччиною, та пов'язані з фінансовими,

соціальними та політичними факторами. Результати цього дослідження можуть бути корисними для місцевих органів влади та дослідників, які займаються плануванням та розробкою стратегій для міст, що засвідчують зменшення населення. Якщо в статті [4] увага більше приділяється економічним аспектам та типізації то у статті [5] звертається увага на необхідності переходу до селективного демонтажу, який передбачає розбір будівель на компоненти та матеріали з метою подальшого вторинного використання. Автори наводять приклади сучасних практик селективного демонтажу в інших країнах та аргументують важливість його впровадження в контексті сталого розвитку та екологічної відповідальності. Дослідження виявляє потенціал для розвитку селективного демонтажу у В'єтнамі, враховуючи розширення будівельної індустрії та необхідність зменшення впливу будівництва на довкілля. В статті пропонуються рекомендації та стратегії для підтримки впровадження селективного демонтажу, включаючи законодавчу базу, стимули для індустрії та підвищення свідомості про переваги цього підходу. В статті [9] авторами також описано підходи до оцінки та вибору схем демонтажу, врахування екологічних та соціально-економічних аспектів прийняття рішень зносу будівель.

Багато наукових досліджень присвячено використанню чи правильній утилізації матеріалів та конструкцій, що утворились в наслідок демонтажу [6–8]. Ці статті присвячені дослідженню та аналізу ефективності застосування різних стратегій управління відходами на різних етапах циклу переробки відходів.

Як бачимо останні дослідження роблять акцент і віддають пріоритет демонтажу (знесенню) конструкцій та переробки будівельного сміття будівель, які планово виведені із експлуатації та їх присутність перешкоджає новій забудові території. Ці праці не стосуються розроблення виконавчої (робочої) документації на демонтажні роботи тим більше в складних умовах аварійної ситуації та діючого виробництва. Аварійна ситуація вимагає швидко оцінювати умови, пропонувати, розробляти рішення та відповідно діяти.

Викладення основного матеріалу дослідження. В перші години в наслідок настання аварійної ситуації перш за все, постає необхідність забезпечити безпеку задіяного робочого персоналу та довкілля. Для цього необхідно було у найкоротші терміни:

- відключити всі комунікації та системи живлення в будівлі;
- загасити пожежу яка виникла внаслідок вибуху авіорагети.
- виконати оцінку ступеня пошкодження будівлі;
- визначення основних проблем та розробка плану демонтажу зруйнованих та пошкоджених конструкцій.

Оскільки склалася аварійна ситуація, слід було прискорити процес демонтажу аварійних конструкцій, щоб мінімізувати можливі наслідки, такі як забруднення довкілля та ризик пошкодження інших будівель, обладнання та інженерних систем на території підприємства.

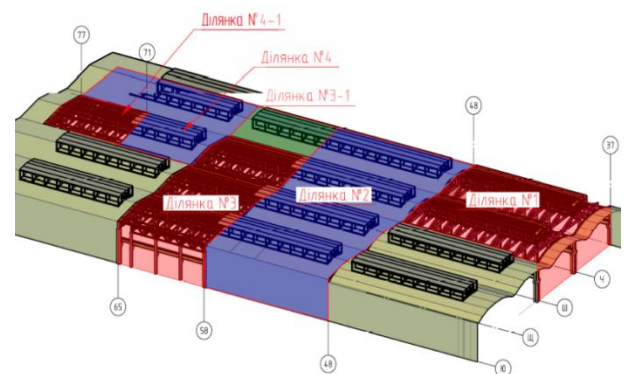


Рис. 3. Поділ будівлі на ділянки

Найперше, що було необхідно це демонтувати пошкоджені конструкції та обладнання, які потенційно можуть становити небезпеку (наприклад, обвалення конструкції, пошкоджені системи живлення тощо). Далі слід було продовжувати демонтаж поетапно, враховуючи особливості будівлі, розбивку на ділянки та можливі ризики.

Будівлю умовно було поділено на 6 ділянок (рис. 3), що найбільше постраждали внаслідок ракетної атаки.

На (рис. 3) червоним зазначені ті ділянки, що постраждали найбільше.

Схеми найбільш постраждалих частин представлені на (Рис. 4, а–в).

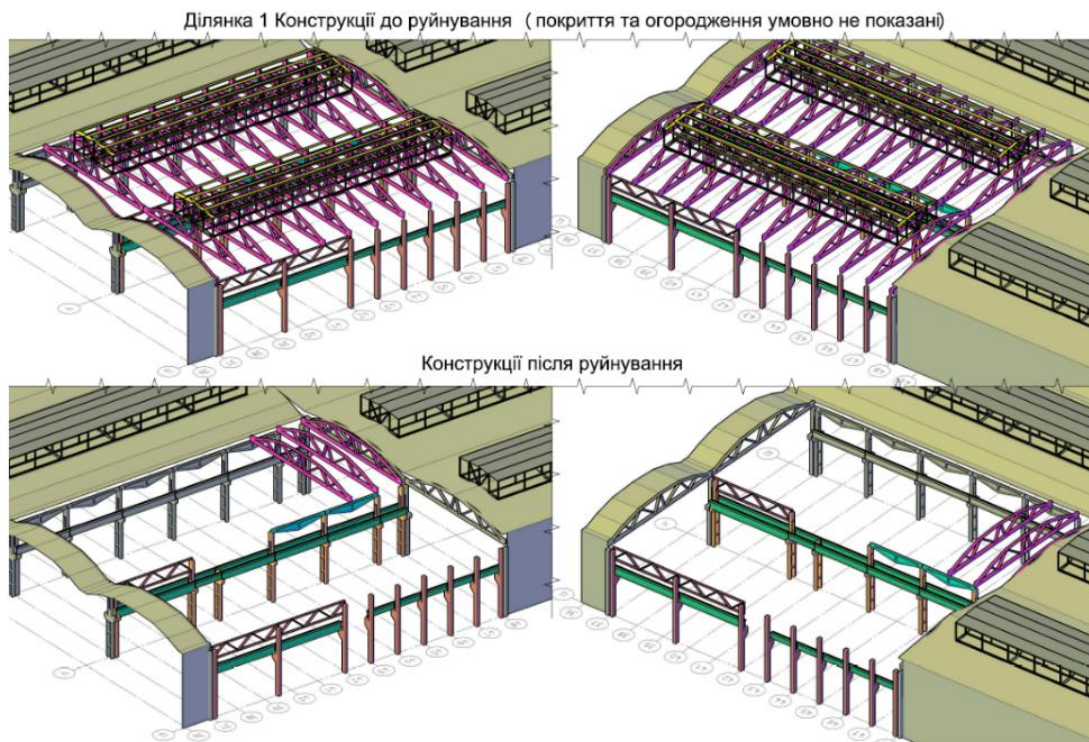


Рис. 4, а. 1-ша ділянка (представлені схеми конструкцій до руйнування та після)

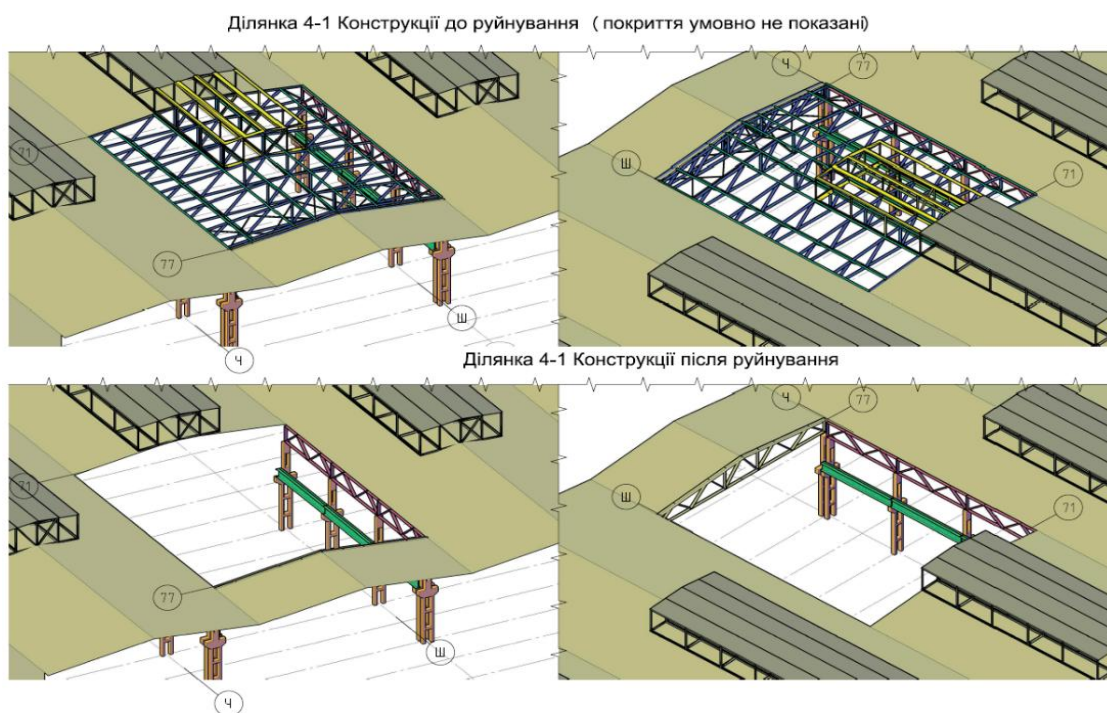


Рис. 4, б. Ділянка 4, 4-1 (представлені схеми конструкцій до руйнування та після)

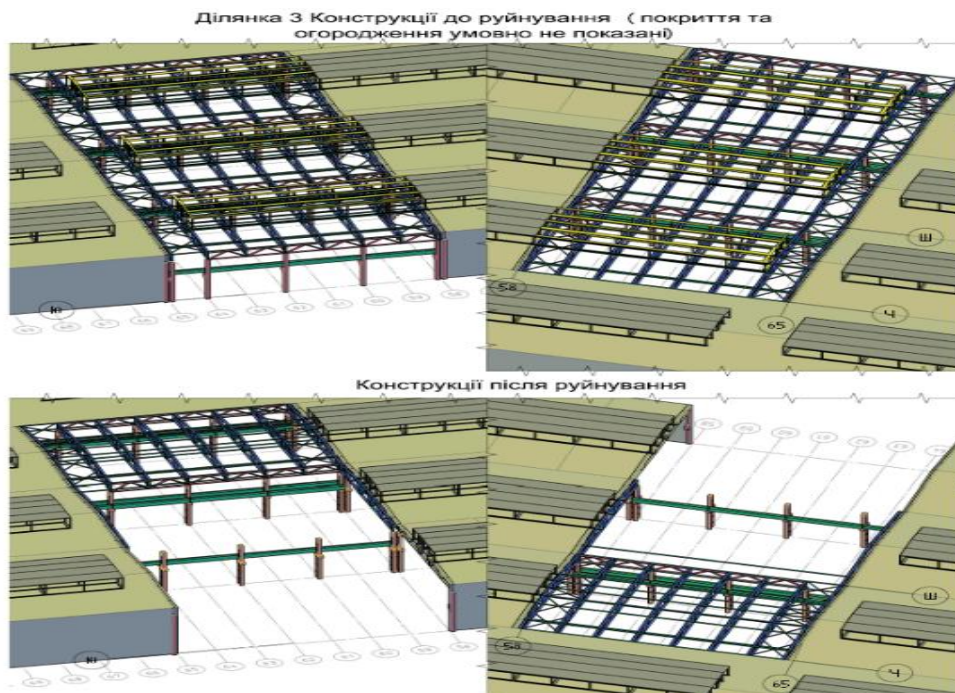


Рис. 4, в. Ділянка 3 (представлені схеми конструкцій до руйнування та після)

Після проведення всіх аварійних заходів, спеціалісти здійснили діагностику технічного обстеження конструкцій, що знаходилися поза небезпечною зоною

обвалення аварійних конструкцій. Після закінчення огляду та технічної експертизи була проведена приблизна оцінка обсягу виконання аварійних робіт (табл. 2).

Таблиця 2

Приблизна відомість аварійно-демонтажних робіт

№ п.п.	Найменування конструкцій	Од. виміру	Кількість
1. Конструкції світлоаераційного ліхтаря			
1.1	Демонтаж металевих конструкцій світлоаераційних ліхтарів промислових будівель висотою до 25м	т	160
1.2	Демонтаж покриття з металевих листів по конструкціям ліхтаря	т	195
1.3	Демонтаж покриття з збірних ребристих плит по конструкціям ліхтаря	м ³ /т	220/514
1.4	Демонтаж профільованого листа огороження ліхтаря	м ² /т	2270/72
1.5	Демонтаж металевих листів огороження ліхтаря	м ² /т	1290/25
1.6	Демонтаж бортових плит ліхтаря	м ³ /т	40/85
2. Конструкції каркасу			
2.1	Демонтаж металевих конструкцій ферм довжиною 30 м по залізобетонному каркасу	т	510
2.2	Демонтаж залізобетонних конструкцій ферм довжиною 30 м по залізобетонному каркасу	м ³ /т	144/336
2.3	Демонтаж металевих конструкцій підкрівельних ферм довжиною 12–36 м	т	135
2.4	Демонтаж металевих конструкцій підкранових балок 6–36 м	т	728
2.5	Демонтаж залізобетонних колон крайнього ряду	м ³ /т	225/510
2.6	Демонтаж залізобетонних колон середнього ряду	м ³ /т	432/993
2.7	Демонтаж металевих в'язів по залізобетонному каркасу	т	165
2.8	Демонтаж металевих площадок та огороження	т	150
3. Покриття по фермах			
3.1	Демонтаж покриття з металевих листів по конструкціям ферм	т	515
3.2	Демонтаж покриття з збірних ребристих плит по конструкціям ферм	м ³ /т	325/811
4. Огороджувальні конструкції			
4.1	Демонтаж металевих конструкцій каркасу скління	м ² /т	1512/75
4.2	Демонтаж збірних залізобетонних фасадних плит, довжиною 12 м	м ³ /т	140/460
4.3	Демонтаж збірних залізобетонних фасадних плит, довжиною 6 м	м ³ /т	60/155
4.4	Демонтаж профільованого листа огороження фасадів	м ² /т	667/21
4.5	Демонтаж воріт промислових будівель	т	14

На першому етапі необхідно було прибрати вже зруйновані конструкції та ті що зруйновані, але залишались закріплені та мали загрозу обвалення розчистити та підготувати робочі ділянки, щоб у подальшому встановити вантажопідіймальні крани та безпечно виконати демонтаж

конструкцій, що менше постраждали (рис. 5, 6).

Для переважної більшості робіт було доцільно використовувати екскаватори з різним навісним обладнанням (ківш, захвати, гідроніжиці та гідромолоти).



Рис. 4. Очищення ділянки від зруйнованих конструкцій (фото до)

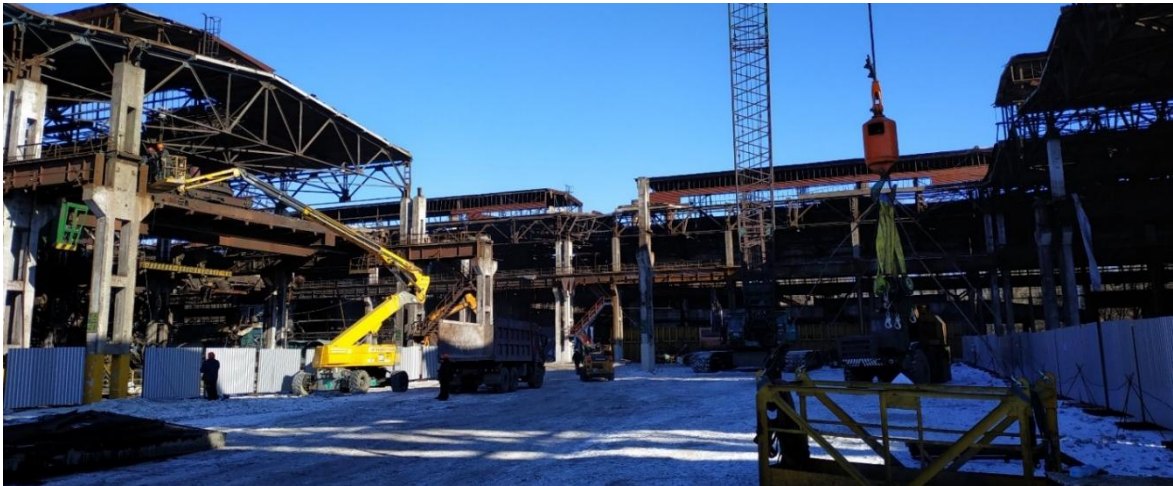


Рис. 6. Фото ділянки після очищення

Наступна задача полягала в тому щоб демонтувати аварійні конструкції, що залишалися бути приєднаними до каркасу: наприклад стінові панелі та прогони, що були в аварійному стані та могли обвалитися в будь-який час.

В загальному випадку технологія демонтажу панелей на значній висоті (від 7 м і більше) не відрізняється від монтажу, тільки йде у зворотному напрямку і передбачає:

- Огородження небезпечної зони, відстань від будівлі до небезпечної зони розраховується згідно додатку Е [10], для верхньої плити – 7м ;
- Встановлення вантажопідіймального крану та автогідропідіймача;
- Оцінка стану панелі, визначення місць кріплення панелі до будівлі, як правило проводиться з колиски підвішеній

до гаку крану, або з платформи автогідропідіймача;

- Виконання стропування конструкції, що демонтується (виконання отворів в конструкції чи приварювання провусин до металевих частин панелі) та дати натягнення стропів;

- Робітнику на робочій платформі автогідропідіймача піднятися на рівень виконання робіт та виконати від'єднання, застропленого елемента від каркасу будівлі (відрізати металеві закладні деталі). Забороняється знаходження робітників під елементом, що демонтується та в небезпечній зоні;

- Спустити відділену плиту на рівень землі в зону складування демонтованих елементів.

Але в даних умовах таку технологію використовувати немає змоги, тому що плити дуже пошкоджені і вже не мають

конструктивної жорсткості, якщо навіть вдасться їх застропити, то при відрізанні закладних в місцях кріплення вони можуть скластися в довільному напрямку та зашкодити будівельним машинам та робітникам, що задіяні в демонтажних роботах. В таких випадках доцільно використовувати механічний демонтаж екскаваторами, але навіть екскаватор масою 30–40 т зі стандартною стрілою не впорається, тому що верхні плити знаходяться на значній висоті (понад 17 м), та ще й екскаватор повинен стояти поза небезпечною зоною, тобто в радіусі понад 7 м від аварійних конструкцій;

Для цієї роботи підійшов би екскаватор з подовженою стрілою. По своїм характеристикам він міг би з безпечної відстані виконати цю роботу, але по причині

високої завантаженості таких машин на відновленні інших будівель, високої вартості їх перебазування на майданчик та вартості роботи прийшлося відмовитись від їх застосування.

В результаті тісної співпраці ТОВ «Будівельна компанія «Ольвія» та ДВНЗ «ПДАБА» попередньо було розроблено альбом типових технічних схем «Принципові технічні рішення виконання демонтажних робіт» [11]. Одне з представлених рішень – це подовжувач стріли екскаватора для виконання демонтажних робіт. Схема демонтажу за допомогою екскаватора з подовжувачем стріли представлена нижче (рис. 7).

Сам подовжувач має вигляд (рис. 8), а фото готового технологічного пристрою (рис. 9) та фото його роботи (рис. 10).

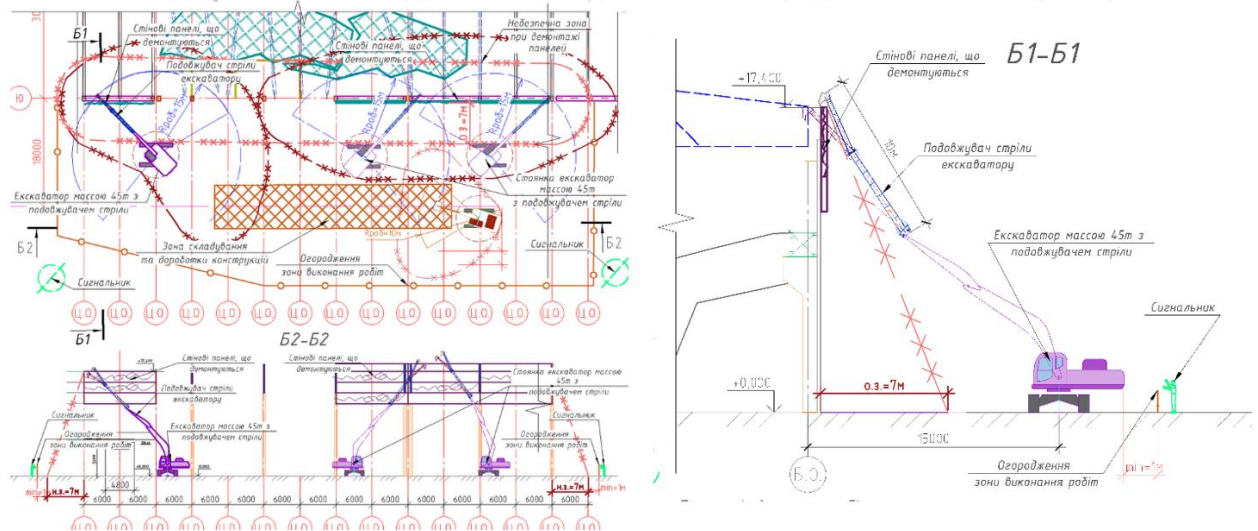


Рис. 5. Принципова схем демонтажу за допомогою екскаватора з подовжувачем стріли

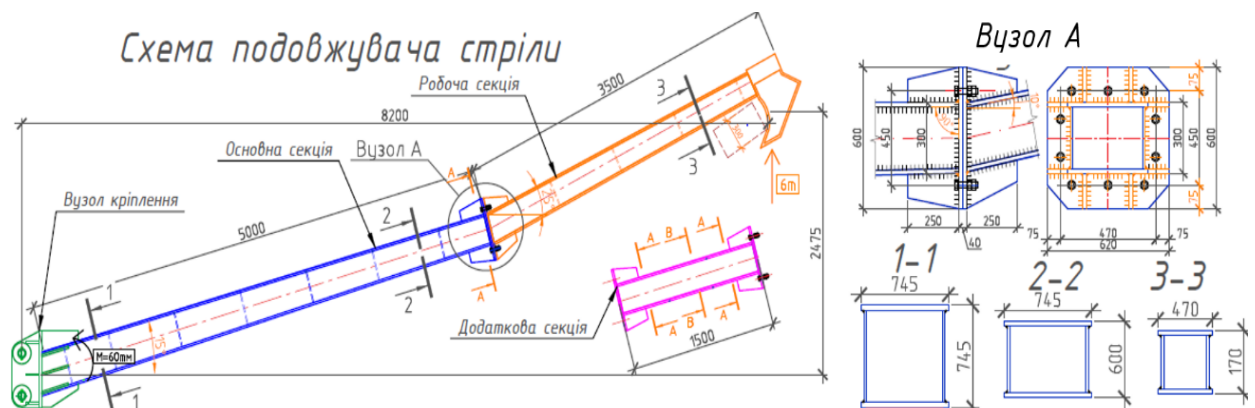


Рис. 8. Конструкційна схема подовжувача стріли екскаватора



Рис. 9. Фото подовжувача стріли на площадці зберігання



Рис. 10. Фото виконання робіт

Технологія виконання робіт при демонтажі панелей з використанням екскаватору з подовжувачем стріли передбачає:

- Виконати огороження зони виконання робіт стійчати́м огороження́м;
- Виконати навішування подовжувача стріли замість ковша;
- Екскаватору підїхати в зону демонтажу;
- За допомогою подовжувача закріпити аварійні стінові панелі та за допомогою гідравліки екскаватору виконати стягнення панелей з обваленням на рівень землі;
- Після виконання демонтажу відїхати на іншу стоянку.

Іншим екскаватором з гідромолотом розташованим поза небезпечною зоною обвалення панелей виконати доопрацювання панелі в зручній для завантаження та перевезення габарит.

Через аварійний стан конструкцій покриття, спричинений значними пошкодженнями внаслідок ракетної атаки,

виникла необхідність використання спеціальних технологій для демонтажу. Основним критерієм підбору обладнання була безпека робітників та мінімізація ризиків подальших обвалів нестабільних конструкцій. Тому для виконання демонтажних робіт були обрані гусеничні крани високої вантажопід'ємності, оснащені подвійними крюковими підвісками, що дозволяють одночасно транспортувати як робітників, так і демонтовані плити. Така технологія забезпечує контрольований демонтаж у складних умовах, дозволяючи оперативно і безпечно виконувати роботи на небезпечних ділянках.

Для демонтажу конструкцій були підібрані та задіяні гусеничні крани високої вантажопід'ємності 100 та 250 т з рухомими гаками. Крани будуть встановлювати на різних ділянках. А головною особливістю цих кранів є те, що в них є 2 крюкові підвіски на одному гаку (рис. 11), кожна з них має окремий механізм (гальма, лебідку, запасовки).

Це дозволяє завантажувати ці 2 гаки одночасно. На один гак навішується колиска з робітниками, а за інший можливо застропити плиту, що демонтується.

Таку технологію виконання робіт було прийнято для демонтажу аварійних панелей на цьому об'єкті. Схема виконання робіт (рис. 12) також увійшла в Альбом технічних рішень [11]. Фото виконання демонтажу дивись (рис. 13).

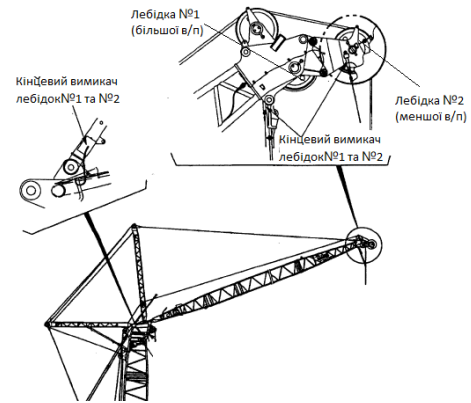


Рис. 11. Схема крюкової підвіски з 2 гаками

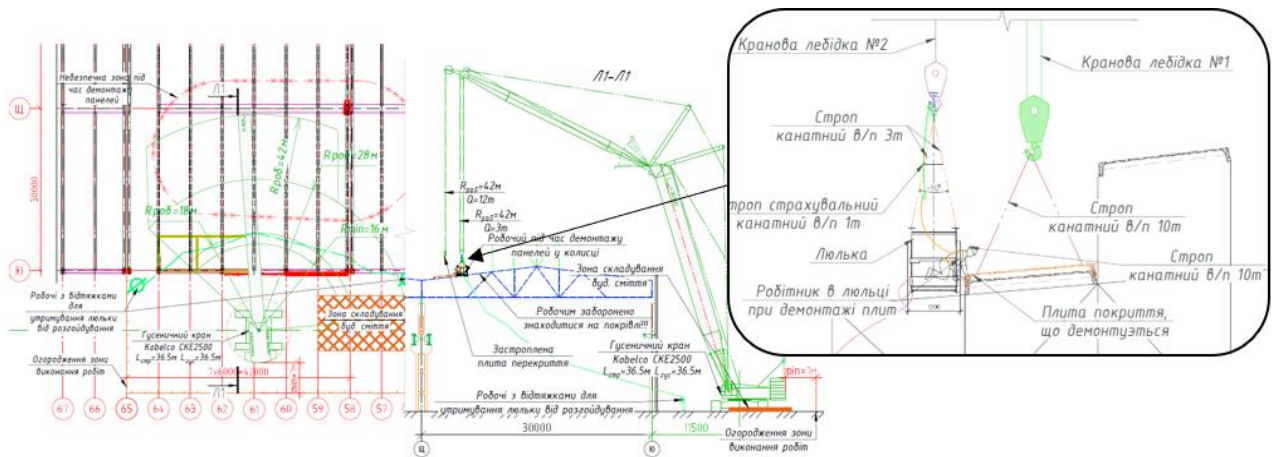


Рис. 12. Схема демонтажу аварійних плит покриття



Рис. 13. Фото демонтажу аварійних плит покриття

**Послідовність виконання операції
при роботі в люльці:**

- Встановити кран в зоні виконання робіт;
- Приготувати люльку до роботи в зоні складування;
- Виконати стропування люльки (рис. 14), за гак з меншою вантажопід'ємності, вантажопід'ємність на заданому вильоті повинна бути в 1.5 рази більша ніж вага люльки з робітниками і обладнанням;

- Підняти люльку на 0.3м від рівня землі на майданчику складування, перевірити надійність стропування, опустити колиску;
- Робочим зайти в колиску та закріпитися запобіжним поясом за страхувальний строп підвішений до гаку крану;
- Перенести колиску на потрібний рівень в зону виконання робіт;
- Встановити колиску на висоті не більше 100 мм від аварійної покрівлі;

• Підвести гак крану № 2 та застропити аварійну плиту/лист металу;

• Робочим за допомогою ручного інструменту від'єднати плиту від загального масиву та перенести в зону тимчасового складування.

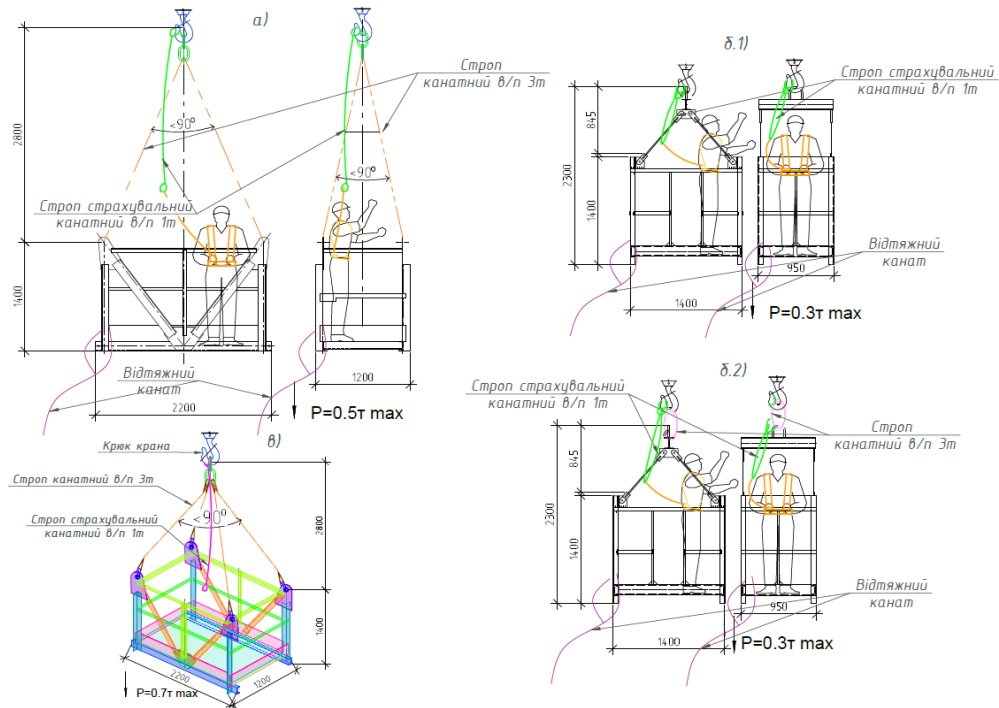


Рис. 14. Стропування люльки (колиски), підвішеної на гак крану: а – стропування колиски без траверси; б. 1 – стропування колиски з інвентарною траверсою на колисці, безпосередньо на гак крану; б. 2 – стропування колиски з інвентарною траверсою на колисці, через строп; в – аксонометрична схема стропування колиски

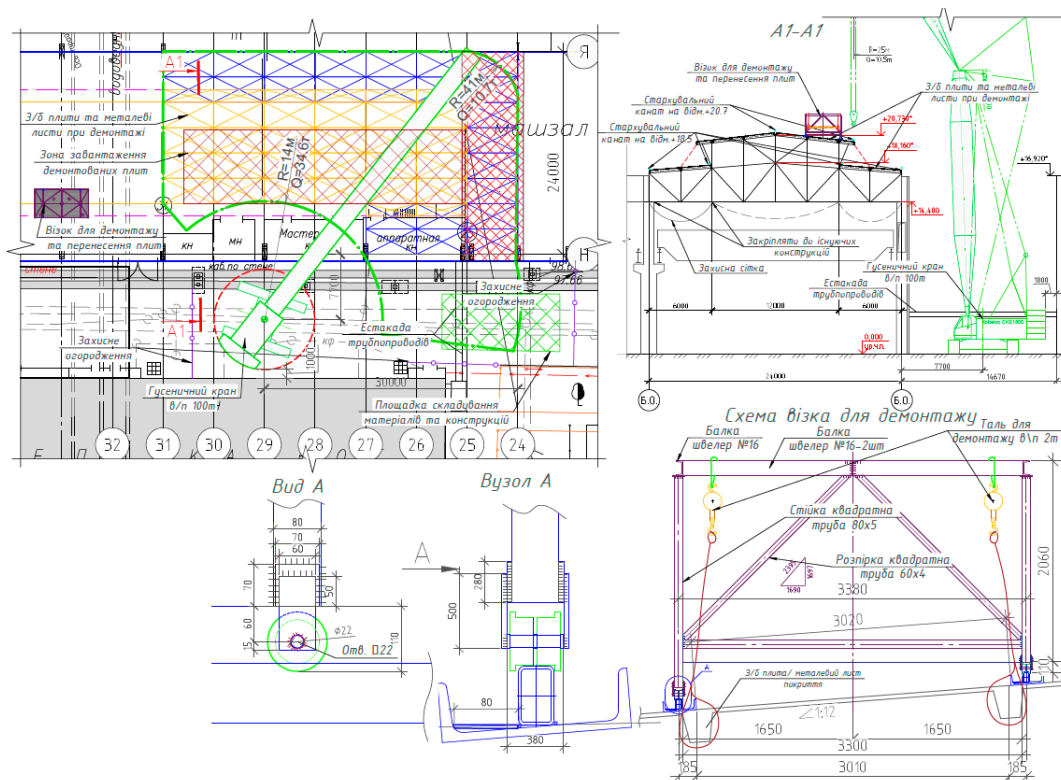


Рис. 15. Технологічна схема демонтажу плит за допомогою спеціалізованого візка



Рис. 16а. Схеми встановлення трапів

Після демонтажу частин будівлі, що знаходилися в аварійному стані, стало можливим перейти до демонтажу вцілілих частин покриття, які відведені під демонтаж. Технологія та організація даних робіт описана в багатьох статтях [4–5; 8–9]. Однак всі ці технології передбачають використання кранів, що на необхідному вильоті та висоті підйому така мають необхідну вантажопід'ємність. Варіанти, що не відповідають цим умовам не розглядаються. Наступний метод робіт частково може подолати цю проблему. В нашій споруді, що розглядається доволі велика ділянка, що зазнала руйнувань. Конструкції не попадають в зону роботи кранів. Задача полягала в тому, щоб демонтувати плити покриття/ металеві листи, на не пошкоджених ділянках та поза зоною досягнення роботи крану.

Для розв'язання цього завдання було прийнято наступну технологічну схему (рис. 15) виконання робіт за допомогою спеціалізованого візка.

Послідовність технологічної операції при виконанні робіт з візком:

Підготовчі роботи:

- Виконати обстеження покрівлі, якщо вона знаходиться в задовільному стані та на ній можуть знаходитись робітники;
- Робітникам піднятися на покрівлю по існуючим драбинам;
- Закріпити страхувальні канати за існуючі конструкції та покласти дерев'яні трапи на покрівлю (рис. 16а), при виконанні



Рис. 16б. Схеми спец. страхувальної системи

робітникам постійно бути закріпленими запобіжним поясом за конструкції, або встановлений страхувальний канат;

- Закріпити спеціалізовані страхувальні системи (рис. 16б) до існуючих конструкцій. Принцип дії страхувальної системи полягає в тому, що вона дає вільний рух робітнику вона розтягується при нормальній швидкості руху, а якщо швидкість перевищує 1 м/с (швидкість падіння), вона зупиняється (встановлюється на гальма) та тримає стропа в натягненні;

- Робітникам встановити напрямні рейки (див. вузол А рис. 14).

Встановити візок в робоче положення на напрямні рейки (рис. 17)

Основний технологічний процес:

- Робітникам підігнати візок над плиту/лист, що демонтується.
- Виконати пробивання отворів для стропування в залізобетонній плиті та приварювання провудин на металевий лист.
- Виконати стропування плити/ листа за талі навішені на візку.
- Виконати відокремлення залізобетонної плити за допомогою ручного інструменту (розбити шви та обрізати закладні деталі). Для металевих листів виконати від'єднання їх закладні деталі (рис. 17).
- За допомогою талей підняти, від'єднаний лист на 200–300 мм від покрівлі.



Рис. 17. Фото демонтажу покрівлі за допомогою спеціального візку

- Перевезти відокремлений лист за допомогою візка перевезти по напрямних рельсах перевезти в зону роботи крану.
- В зоні роботи крану опустити плиту/лист на покрівлю та розстропити її з талів;
- Та прибрати плиту/лист краном.

Висновки

В статті описано комплекс робіт, який необхідно виконати при ліквідації наслідків ураження промислового комплексу. На прикладі демонтажу конструкцій аварійної

промислової будівлі, що постраждала від ракетної атаки показано іноваційні технологічні рішення, що дозволяють знизити трудомісткість, підвищують ефективність застосування будівельних механізмів та забезпечують безпеку праці на об'єкті. Описані технологічні схеми, що використані придатні для виконання робіт на майже всіх промислових об'єктах зважаючи на їх технічний стан та навколишнє середовище майданчику.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Naumov V., Bilokon A., Sokolov I., Plakhtii Y., Nesevrya P. Technology for Performing Emergency Dismantling Works at an Industrial Facility Destroyed Due to Military Actions. In: Feng, G. (eds). *Proceedings of the 10th International Conference on Civil Engineering, ICCE-2023. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 526. Springer, Singapore, 2004. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4355-1_60
2. Llorente C., Cabrera M., Mateo A. Circular construction process : method for developing a selective, low CO₂eq disassembly and demolition plan. *Journal of Cleaner Production*. 2020. № 257. URL: <https://doi.org/10.3390/su133168815>
3. Zhisheng Jiang, Wenzhong Zheng, Ying Wang, Sheng Li, Linqi Sun. Green demolition technology of reinforced concrete slab : application of soundless chemical demolition agents and its evaluation system. First published: 11 February 2023. Heilongjiang Touyan Innovation Team Program. Grant/Award Number: 2019-49. URL: <https://doi.org/10.1002/suco.202201162>
4. Ngoc Han Hoang, Tomonori Ishigaki, Takuma Watari, Masato Yamada, Ken Kawamoto. Current state of building demolition and potential for selective dismantling in Vietnam. *Waste Management*. 2022. Vol. 149. Pp. 218–227. ISSN 0956-053X. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.007>
5. Wang Q., Jiang T., Liu L., Zhang S., Kildunne A., Miao Z. Building a whole process policy framework promoting construction and demolition waste utilization in China. *Waste Management & Research*. 2023. № 41 (4). Pp. 914–923. doi:10.1177/0734242X221126393.

6. Mesa Jaime A & Fúquene Carlos & Maury-Ramirez Anibal. Life Cycle Assessment on Construction and Demolition Waste: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Pp. 7676. doi: 10.3390/su13147676.
7. Marina Ilić, Magdalena Nikolić. Waste management benchmarking : a case study of Serbia, *abitat International*. Vol. 53. 2016. Pp. 453–460. ISSN 0197-3975. URL: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.12.022>
8. Білоконь А. І., Несеєв П. І., Наумов В. О. Систематизація і типізація проектних рішень знесення та демонтажу будівель і споруд. *Металознавство та термічна обробка металів*. № 4 (99). 2022. С. 18–31. URL: <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.271222.18.907>.
9. Білоконь О. І., Несеєв П. І., Наумов В. О. Аналіз основних технічних рішень у проектах зносу будівель та споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 3. С. 15–26. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.050722.15.860>.
10. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці та промислова безпека у будівництві. Основні положення (НПАОП 45.2-7.02-12). Вид. офіц. Київ : Мін-во регіон. розвитку та будівництва України, 2012. 122 с. URL: https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2016/04/32_2_2009.pdf
11. Наумов В. О., Білоконь А. І., Несеєв П. І., Поваляєв І. С. Принципові технічні рішення при виконанні демонтажних робіт Будівель і споруд. Альбом технічних рішень. Дніпро : ВНЗ «ПДАБА», ТОВ «БК «Ольвія»», 2023. 28 с.

REFERENCES

1. Naumov V., Bilokon A., Sokolov I., Plakhtii Y. and Nesevrya P. Technology for Performing Emergency Dismantling Works at an Industrial Facility Destroyed Due to Military Actions. In: Feng, G. (eds). *Proceedings of the 10th International Conference on Civil Engineering*. ICCE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 526, Springer, Singapore, 2002. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4355-1_60
2. Llorente C., Cabrera M. and Mateo A. Circular construction process : method for developing a selective, low CO₂eq disassembly and demolition plan. *Journal of Cleaner Production*. 2020, no. 257. URL: <https://doi.org/10.3390/su133168815>
3. Zhisheng Jiang, Wenzhong Zheng, Ying Wang, Sheng Li and Linqi Sun. Green demolition technology of reinforced concrete slab : application of soundless chemical demolition agents and its evaluation system. First published: 11 February 2023. Heilongjiang Touyan Innovation Team Program, Grant/Award Number: 2019-49. URL: <https://doi.org/10.1002/suco.202201162>
4. Ngoc Han Hoang, Tomonori Ishigaki, Takuma Watari, Masato Yamada and Ken Kawamoto. Current state of building demolition and potential for selective dismantling in Vietnam. *Waste Management*. Vol. 149, 2022, pp. 218–227. ISSN 0956-053X. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.007>.
5. Wang Q., Jiang T., Liu L., Zhang S., Kildunne A. and Miao Z. Building a whole process policy framework promoting construction and demolition waste utilization in China. *Waste Management & Research*. 2023, no. 41 (4), pp. 914–923. doi:10.1177/0734242X221126393.
6. Mesa Jaime A & Fúquene Carlos & Maury-Ramirez Anibal. Life Cycle Assessment on Construction and Demolition Waste : a Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2021, vol. 13, pp. 7676. doi: 10.3390/su13147676.
7. Marina Ilić and Magdalena Nikolić. Waste management benchmarking : a case study of Serbia, *abitat International*. Vol. 53, 2016, pp. 453–460. ISSN 0197-3975. URL: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.12.022>
8. Bilokon A.I., Nesevria P.I. and Naumov V.O. *Systematyzatsiia i typizatsiia proektnykh rishen znesennia ta demontazhu budivel i sporud* [Systematization and typification of project solutions for demolition and dismantling of buildings and structures]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2022, no. 4 (99), pp. 18–31. URL: <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.271222.18.907>. (in Ukrainian).
9. Bilokon O.I., Nesevria P.I. and Naumov V.O. *Analiz osnovnykh tekhnichnykh rishen u proektakh znosu budivel ta sporud* [Analysis of the main technical solutions in projects of demolition of buildings and structures]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 3, pp. 15–26. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.050722.15.860> (in Ukrainian).
10. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці та промислова безпека у будівництві. Основні положення (НПАОП 45.2-7.02-12) [DBN A.3.2-2-2009. System of labor safety standards. Occupational safety and industrial safety in construction. Basic provisions (NPAOP 45.2-7.02-12)]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2012, 122 с. URL: https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2016/04/32_2_2009.pdf (in Ukrainian).
11. Naumov V.O., Bilokon A.I., Nesevria P.I. and Povaliaiev I.S. *Pryntsypovi tekhnichni rishennia pry vykonanni demontazhnykh robot Budivel i sporud. Albom tekhnichnykh rishen* [Basic technical solutions for dismantling buildings and structures. Album of technical solutions]. Dnipro : SHEI “PSACEA” Publ., LLC “BK “Olviia”” Publ., 2023, 28 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 01.11.2024.

УДК 624.15

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.123.1119

ЗАСТОСУВАННЯ ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ОСНАЩЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ ПІДРОЗДІЛІВ ЗСУ

РУДІН А. А.^{1*}, асп.,

НЕСЕВРЯ П. І.², канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-76, e-mail: aconicus@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4215-3884

² Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-76, e-mail: nesevrya.pavlo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2371-7381

Анотація. Постановка проблеми. Для визначення можливості переміщення військової техніки у різних польових умовах особливої уваги потребує оперативний контроль ґрунтової основи. Одним із методів досліджень властивостей та структури ґрунту є метод статичного або динамічного зондування, який може бути реалізовано за допомогою такого портативного приладу як пенетрометр. Важливою особливістю методу зондування є визначення в польових умовах меж розташування ґрунтових шарів, а також проведення оцінки ступеню однорідності ґрунту, як непрямой ознаки його основних фізико-механічних властивостей. Даний метод досліджень дозволяє провести оперативну оцінку несучої здатності ґрунтової основи не тільки з точки зору прохідності важкої техніки, але і для визначення умов та можливих трудовитрат для влаштування фортифікаційних споруд, які пов'язані із земляними роботами і відповідно залежать від ґрунтових умов майданчику. Стаття присвячена темі використання як портативних ручних пенетрометрів так і варіантів на гідравлічному приводі, які застосовуються для оснащення спеціальних машин інженерних підрозділів армій різних країн. Також визнана необхідність власного виробництва таких пристроїв та їхнього оснащення відповідних підрозділів ЗСУ для оперативного контролю якості ґрунтової основи в польових умовах. **Наукова новизна і практична значимість.** Визнана необхідність оснащення пенетрометрами спеціальних інженерних машин Збройних сил України, а також деяких ракетних установок. **Висновки.** На основі аналізу досліджень можна зробити висновок про перспективність та необхідність застосування методу зондування ґрунтової основи в інженерних підрозділах Збройних сил України та необхідність розробки, виробництва та оснащення військової техніки портативними пенетрометрами, що дозволить виконувати оперативний аналіз стану ґрунтової основи в польових умовах.

Ключові слова: зондування; дослідження ґрунтів; військова інженерна техніка

APPLICATION OF PROBING FOR THE EQUIPMENT OF ENGINEERING UNITS OF THE AFU

RUDIN A.A.^{1*}, Postgrad. Stud.,

NESEVRYA P.I.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Department of Construction Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056)-756-34-76, e-mail: aconicus@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4215-3884

² Department of Construction Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056)-756-34-76, e-mail: nesevrya.pavlo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2371-7381

Abstract. Problem Statement. To assess the mobility of military equipment in various field conditions, special attention is required for the rapid monitoring of soil foundations. One effective method for studying soil properties and structure is static or dynamic probing, which can be performed using a portable device such as a penetrometer. A key advantage of the probing method is its ability to determine the location of soil layers in field conditions and to evaluate soil homogeneity, which indirectly reflects its main physical and mechanical properties. This method provides an expedient assessment of the soil's load-bearing capacity, not only in terms of heavy equipment passability but also to estimate the conditions and labor requirements for constructing fortifications, which depend on the site's soil conditions. The article focuses on the use of both portable handheld penetrometers and hydraulic-driven options that are used to equip special engineering vehicles in the armies of various countries. Additionally, the need for domestic

production of such devices and their equipping in the relevant units of the Armed Forces of Ukraine (AFU) for the operational control of soil foundation quality in field conditions has been recognized. **Scientific Novelty and Practical Significance.** The study identifies the need for penetrometers in specialized engineering vehicles of the Armed Forces of Ukraine, as well as for certain missile systems. **Conclusions.** Based on the research analysis, it is concluded that there is significant potential and necessity for applying soil probing methods within the engineering units of the Ukrainian Armed Forces. Furthermore, the development, production, and deployment of portable penetrometers for military equipment would enable rapid analysis of soil conditions in field environments.

Keywords: *probing; soil investigation; military engineering equipment*

Проблема. До недавнього часу відносно маловідомою сферою застосування динамічного та статичного зондування, зокрема й малогабаритних ручних забивних зондів, була військова сфера. Спорудження об'єктів польової фортифікації неможливе без дослідження властивостей ґрунтів. Особливо затребувані для використання в бойових умовах так звані «експрес-методи», до яких можна віднести дослідження ґрунтів за допомогою ручних малогабаритних пристроїв.

Окрім того для оперативної польової перевірки прохідних шляхів військова техніка потребує портативних рішень щодо контролю якості ґрунтової основи.

До 1991 року в Україні питанням інженерного обладнання бойових позицій та прохідності доріг для важкої техніки приділялося велике значення під час підготовки майбутніх військових інженерів у навчальних закладах. Але згадки про пенетрометри різних типів, які використовуються в арміях різних країн, зустрічаються лише в спеціалізованих виданнях.

Метою даної **роботи** є визначення важливості практичного застосування методу зондування ручними малогабаритними пристроями у військовій сфері.

Аналіз публікацій. Військові підрозділи сучасних армій світу вже тривалий час активно використовують різні модифікації установок для зондування і передусім динамічного. Для визначення міцності ґрунту в польових умовах, в інженерних частинах армії США (рис. 1, 2) в даний час використовуються вдосконалені конусні твердоміри (пенетрометри), які також можуть бути відкалібровані для визначення щільності снігу, наприклад, для будівництва аеродромів у зимових умовах [1; 2].



Рис. 1. Застосування пенетрометрів інженерними підрозділами армії США для контролю ґрунтової основи



Рис. 2. Застосування пенетрометрів інженерними підрозділами армії США при будівництві злітно-посадкової смуги

В армії США для визначення несучої здатності ґрунту та оцінки придатності місцевості для пересування застосовується так званий конусний показник RCI (Rating Cone Index), який визначається за допомогою конусного пенетрометра. Збройні сили США та Великої Британії накопили великий досвід використання конусного пенетрометра та вимірювання показника RCI для різних типів ґрунтів [3–8].

Зокрема в США існують портативні моделі динамічних зондів для роботи з яким достатньо одного оператора, такі як наприклад DCP Model K100 M (рис. 3) виробництва Kessler Soils Engineering Products Inc. Company та S-222 компанії

DGSI Durham Geo Slope Indicator (рис. 4), що робить їх особливо зручними у використанні.



Рис. 3. Робота оператора з пенетрометром DCP Model K100 M



Рис. 4. Пенетрометр S-222

Також практичного застосування набули цивільні моделі пенетрометрів для контролю ґрунтової основи майданчику нового будівництва або вже збудованих споруд та при дорожньому будівництві (рис. 5).



Рис. 5. Використання динамічного пенетрометра в цивільній сфері будівництва

Наукові роботи, в яких детальному теоретичному та експериментальному аналізу піддавалися різні дистанційні забивні зонди (пенетрометри), що використовуються у військовій справі проводились у незначній кількості. Зокрема інформація про пенетрометри різних типів, які

використовують в іноземних арміях, зустрічається лише у вузькоспеціалізованих виданнях.

До 1991 року для розвідки прохідності маршрутів і колонних шляхів інженерні підрозділи використовували ручний пенетрометр РП-1 з глибиною зондування до 0,6 м і зусиллям вдавлювання до 50 кгс. Час, витрачений на одне вимірювання, становив 1 хвилину при темпі ведення розвідки важкопрохідних ділянок до 500 м/год.

Після 1991 року на території України в арсеналі інженерних підрозділів армії також використовуються портативні забивні зонди-пенетрометри. Вони застосовуються для оцінки несучої здатності ґрунтів, тобто за їх допомогою визначають, чи витримає ґрунт у даній місцевості вагу бойової техніки (танків, тягачів, ракетних установок), чи зможуть вони проїхати в цих умовах або навіть обладнати бойову позицію. Зокрема, на озброєнні інженерних підрозділів армії основного противника Збройних сил України знаходяться зразки ракетної техніки, до складу обладнання яких штатно входять пенетрометри різних типів.

До недавнього часу для визначення характеристик ґрунту такі машини комплектувалися ручними забивними пенетрометрами масою 23 кг, робота з яким вимагала значних фізичних зусиль. Однак більш сучасні розробки були вперше штатно оснащені пенетрометром іншого типу на базі гідравлічного приводу. Контейнер з пенетрометром закріплений зовні над бампером у передній частині кабіни, праворуч від водія (рис. 6). У контейнері розташовано гідравлічний привід і манометр. Військовослужбовець прикручує до штоку привода довгу штангу з наконечником спеціальної форми на кінці і впирає її в ґрунт. Після цього він вмикає гідравлічний привід, який повільно вдавлює штангу в ґрунт. Показання відображаються на панелі приладів, розміщеній всередині контейнера, що дозволяє оцінити ґрунтову основи для пересування та подальшого розгортання військової техніки, враховуючи її значну вагу та зміну ґрунтових умов внаслідок регулярного переміщення або погодних умов, які впливають на властивості ґрунту.



Рис. 6. Варіант кріплення контейнера пенетрометра в передній частині кабіни водія

Результати досліджень. На даний момент, в процесі розвитку військової потужності Збройних Сил України, також зростає необхідність оснащення інженерних підрозділів пенетрометрами різних типів. Окрему увагу слід приділити ракетним комплексам.



Рис. 7. Пускова установка Грім-2 (ОТРК «Сапсан») на військовому параді м. Київ, 2018

Гідравлічною пенетраційною установкою може бути обладнана пускова установка ракетного комплексу «Грім-2» або його подальші, більш потужні аналоги

(рис. 7). Можливе оснащення такою пенетраційною установкою однієї з машин забезпечення комплексу РК-360МЦ «Нептун», разом із забивними зондами або техніки їх супроводу та забезпечення.

Однак у цьому питанні існує низка задач, які потребують вирішення і одна з них – практично повна відсутність вітчизняного серійного виробництва установок для зондування ґрунтів, як статичного, так і динамічного. Винятком може бути створений ручний забивний зонд ЛДАТЕ [9], який, за рахунок незначної модифікації, може бути запропонований для оснащення інженерних частин ЗСУ. Зонди такого типу можуть бути також затребувані під час будівництва фортифікаційних споруд.

Висновки

На даний момент, у процесі розвитку військової потужності Збройних Сил України, також зростає необхідність оснащення та модернізації інженерних підрозділів. Окрему увагу слід приділити розвитку устаткування власного виробництва на території України, оскільки наразі майже повністю відсутні установки серійного виробництва для зондування ґрунтів, як статичного, так і динамічного. Це стосується і малогабаритного обладнання. Таким чином в умовах активних бойових дій ситуація з обладнанням для зондування ґрунтів потребує оперативного вирішення для якісного інженерного забезпечення військових підрозділів Збройних Сил України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. US Army TOE Devel Guide. TOE NO 05423C000. Headquarters Departament of the Army, Washington DC, 5. August, 1999.
2. Ernest S. Berney I. V., Jami Lynn Daugherty, Lulu Edwards. Validation of the Automatic Dynamic Cone Penetrometer. US Army Engineer Research and Development Center. Report ERDC/GSL TR-22-16. 2022. URL: <http://dx.doi.org/10.21079/11681/44704>
3. Rowland D. und Peal J. W. Soft Ground Performance Prediction and Assessment for Wheeled and Tracked Vehicles. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Great Britain*. № 205/75.
4. Rowland D. A Review of Vehicle Design for Soft Ground Operation. *Proceedings of the International Society of Terrain-Vehicles Systems (ISTVS)*. 1975.
5. Lazminie J. C. Standards for the Mobility Requirements of Military Vehicles. *Eingeraicht beim britischen Zweig der ISTVS*. 1986.
6. Larminie J. C. Geländegängigkeit von militärfahrzeugen. *Internationale Wehrrevue*. 1988. № 4.
7. Fenwick W. B. Description and application of airfield cone penetrometer. Instruction report 7. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of engineers, Vicksburg, Mississippi, 1965.

8. Webster Steve I., Grau Richard H., Williams Thomas P. Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer. Instruction report GL-92-3. Geotechnical laboratory Department of the army. Waterways Experiment Station. Corps of Engineers. Vicksburg, Mississippi, 1992.

9. Сєдін В. Л., Ульянов В. Ю., Бауск Є. А., Ульянов Я. В. Методика випробувань ґрунтів універсальним динамічним зондом ЛДАТЕ. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 2. С. 19–24.

REFERENCES

1. US Army TOE Devel Guide. TOE NO 05423C000. Headquarters Department of the Army, Washington DC, 5. August, 1999.

2. Ernest S. Berney I.V., Jami Lynn Daugherty and Lulu Edwards. Validation of the Automatic Dynamic Cone Penetrometer. US Army Engineer Research and Development Center. Report ERDC/GSL TR-22-16, 2022. URL: <http://dx.doi.org/10.21079/11681/44704>

3. Rowland D. and Peal J.W. Soft Ground Performance Prediction and Assessment for Wheeled and Tracked Vehicles. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. Great Britain, no. 205/75.

4. Rowland D. A Review of Vehicle Design for Soft Ground Operation. Proceedings of the International Society of Terrain-Vehicles Systems (ISTVS). 1975.

5. Larmine J.C. Standards for the Mobility Requirements of Military Vehicles. Eingereicht beim britischen Zweig der ISTVS. 1986.

6. Larmine J.C. Geländegängigkeit von militärfahrzeugen. Internationale Wehrrevue. 1988, no. 4.

7. Fenwick W.B. Description and application of airfield cone penetrometer. Instruction report 7. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of engineers, Vicksburg, Mississippi, 1965.

8. Webster Steve I., Grau Richard H. and Williams Thomas P. Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer. Instruction report GL-92-3. Geotechnical laboratory Department of the army. Waterways Experiment Station. Corps of Engineers. Vicksburg, Mississippi, 1992.

9. Syedin V.L., Ulyanov V.Yu., Bausk Ye.A. and Ulyanov Ya.V. *Metodyka vyprobuvan gruntiv universalnym dynamichnym zondom LDATE* [Methods of testing soils with a universal dynamic probe LDATE]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 2, pp. 19–24. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.10.2024.

УДК 658.562.09:002+651.4

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.128.1120

ПОШУК МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ДІЛОВОДСТВА ДЛЯ УСТАНОВ, ОРГАНІЗАЦІЙ ТА ПІДПРИЄМСТВ

САВЧЕНКО С. В.¹, *канд. іст. наук, доц.*,
ПРОКОФ'ЄВА К. А.^{2*}, *канд. філол. наук, доц.*,
РЕШЕТИЛОВА О. М.³, *канд. пед. наук, доц.*

¹ Кафедра документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 328-89-23, e-mail: serhijs@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3615-2343

^{2*} Кафедра документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 760-79-90, e-mail: canopa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4242-3346

³ Кафедра документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 585-08-23, e-mail: karunga@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7975-0773

Анотація. У статті розглядається актуальність оптимізації діловодства та документообігу в адміністративних системах. Традиційно діловодство сприймається як технічна функція, однак сучасні вимоги інформаційного суспільства висувають необхідність інтелектуального підходу до керування документами. Автори аналізують основні вимоги до ідеального діловодства, серед яких нормативне забезпечення, організація електронного документообігу, централізація процесів та стандартизація форм документів. Підкреслюються недоліки сучасних систем, такі як недостатнє впровадження нових технологій та відсутність наукового підґрунтя. Запропоновано комплексний підхід для створення ефективного діловодства, що включає планування, автоматизацію, навчання персоналу та гнучкість у прийнятті рішень.

Ключові слова: діловодство; документ; документообіг; документознавство; оптимізація ділових процесів; моделювання

SEARCH FOR A MODEL OF OFFICE WORKFLOW OPTIMISATION FOR INSTITUTIONS, ORGANISATIONS AND ENTERPRISES

SAVCHENKO S.V.¹, *Cand. Sc. (Hist.), Assoc. Prof.*,
PROKOFIEVA K.A.^{2*}, *Cand. Sc. (Phil.), Assoc. Prof.*,
RESHETILOVA O.M.³, *Cand. Sc. (Ped.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI "Institute of Industrial and Business Technologies" of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Nauky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 328-89-23, e-mail: serhijs@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3615-2343

^{2*} Department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI "Institute of Industrial and Business Technologies" of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Nauky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 760-79-90, e-mail: canopa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4242-3346

³ Department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI "Institute of Industrial and Business Technologies" of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Nauky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 585-08-23, e-mail: karunga@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7975-0773

Abstract. The relevance of effective record-keeping in administrative systems is growing due to the increasing role of information in today's society. Traditionally regarded as a technical function, document management now demands intellectual oversight within organizations and in communication between institutions. Current challenges include the need for transparency, legal compliance, preservation of institutional memory, improved governance, and data security. An ideal system encompasses regulatory standards, accountability, and the inclusion of both paper and digital formats. Efficient records management also requires clear definitions of roles and responsibilities, combining paper and electronic workflows effectively. Automation, staff training, and process optimization are key factors for success. Problems within current systems include the limited application of state regulations to private organizations and a lack of research supporting the use of modern technology. Additionally, standardization should not be absolute, as it must balance operational efficiency with adaptability. Centralized operations, pre-screening of documents, and clear

communication are essential for creating streamlined workflows. Ensuring economic benefits through optimized document management is crucial, particularly in commercial enterprises. These systems enhance productivity, reduce operational costs, and facilitate rapid decision-making. Moreover, automated solutions help prevent errors, safeguard compliance, and protect sensitive information. By integrating modern technologies and continuous process improvements, businesses can adapt to evolving market conditions. Ultimately, effective document management serves as a strategic tool, ensuring systematization, control, and improved efficiency across all types of organizations.

Keywords: *office management; document; document management; document science; optimization of office management processes; modeling*

Актуальність. Діловодство завжди було слабкою ланкою як державного управління, так і будь-яких адміністративних систем. Ефективна організація документообігу нерідко недооцінювалася в управлінській практиці. Діловодство традиційно вважалося, подеколи продовжує вважатися, суто технічною, канцелярською справою, технічним елементом реалізації управлінських рішень та адміністративної комунікації.

Певною мірою це так, але сучасні фактори, пов'язані зі зростанням ваги інформації в контексті інформаційного суспільства, висувають на перший план проблеми інтелектуального керування документно-інформаційними процесами як всередині адміністративних систем, так і в межах ділової комунікації між установами.

Чинниками актуалізації проблеми пошуку оптимальної моделі діловодства та документообігу можемо вважати потребу: забезпечення прозорості та підзвітності, раціоналізації всіх ланок робочого процесу; правового забезпечення (відповідності правовим нормам); збереження інституційної пам'яті (передовсім йдеться про збереження важливої інформації для майбутнього використання); підвищення якості управління (можливість контролю виконання рішень, аналіз ефективності процесів, виявлення проблемних місць та їх усунення); вдосконалення комунікаційної функції; гарантування безпеки даних (при зберіганні та передачі); забезпечення економічних переваг та економії витрат установи, організації чи підприємства.

Аналіз попередніх досліджень. До теоретичної та практичної розробки різних аспектів та ракурсів проблеми оптимальної моделі діловодства та документообігу в

різні часи долучалися такі вчені як Ю. Палеха, М. Слободяник, О. Загорецька, Л. Сокур, В. Кудлай, І. Лепетан та інші [1–7; 9].

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення можливості аналізу стану діловодства в різних установах, а також для оцінки його ефективності, важливо мати чітке уявлення про те, яким повинно бути ідеальне діловодство. Зокрема, йдеться про визначення мінімальних нормативних вимог, яким має відповідати установа для того, щоб її діловодство вважалося впорядкованим, а процес управління документами – ефективним. Звісно, передусім потрібно брати до уваги державні рекомендації [8], але пропонувати і власні ідеї.

Отже, аналізуючи масив наукових праць з теорії та практики діловодства, можемо дійти узагальнених висновків про те, що основними аспектами «ідеального діловодства» є такі:

1) визначення нормативних підходів до діловодства та його практичного застосування. Згідно зі стандартом, діловодство – це галузь діяльності, спрямована на документування та організацію роботи з документами. На практиці, діловодство зазвичай охоплює лише організаційно-розпорядчі документи. В ідеалі ж, діловодство повинно охоплювати всі документи, що циркулюють в установі, включно зі звітними, статистичними, договірними, кадровими, бухгалтерськими та іншими системами документації;

2) чітке визначення функцій, обов'язків, прав та відповідальності служб діловодства і кожного працівника організації, залученого до роботи з документами. Це забезпечує прозорість та структурованість процесу документування і управління документами;

3) створення електронного документообігу паралельно з паперовим, а також визначення порядку їхньої взаємодії. Незважаючи на розвиток цифрових технологій, повний перехід на електронний документообіг досі є проблематичним через низку технічних та юридичних питань. Тому ідеальний варіант передбачає ефективне поєднання електронного та паперового документообігу;

4) юридичне оформлення ділових процесів. Це передбачає наявність таких ключових документів, як:

- «Інструкція з діловодства» (на основі «Типової інструкції» формується локальна інструкція, адаптована до потреб конкретної установи);

- приблизний перелік документів із зазначенням строків їх зберігання. Це дозволяє чітко визначити терміни, протягом яких різні види документів мають бути збережені;

- «Положення про службу діловодства» регламентує діяльність відповідної служби;

- «Положення про архів установи» визначає порядок організації архівного зберігання документів;

- посадові інструкції працівників служби діловодства та архіву, які чітко визначають їхні обов'язки та відповідальність;

- «Положення про експертну комісію» установи, яка займається експертизою документів;

- «Табель уніфікованих форм документів», який стандартизує форми документів, що використовуються в установі;

- номенклатура справ, що забезпечує систематизацію та облік всіх документів.

Таким чином, дотримання цих принципів є основою для організації ефективного і впорядкованого діловодства в будь-якій установі. Цілком погоджуємося зі словами С. Верительник, що «...вдало організований документообіг є найважливішим інструментом для вдосконалення будь-яких управлінських структур» [1].

Проте втілення конструктивних підходів у реальні документаційні практики нерідко є проблематичним.

Деякі автори вважають, що раціоналізація документообігу в профільних державних установах здатна позитивно вплинути на якісні зміни в діяльності цих установ. Наприклад, О. В. Ульяновська стверджує, що автоматизація «документообігу в судах є великим кроком для побудови демократичної держави, що забезпечує відкрите і неупереджене правосуддя» [9, с. 186]. На наш погляд, демократія і справедливість як принципи мало залежать від того, в який спосіб (паперовий чи електронний) оформлюються правові рішення і які канали комунікації при цьому використовуються. Оптимізм дослідниці вартий уваги, хоча, він і дещо перебільшений.

Л. Сокур нарікає на відсутність базового закону про діловодство, вказуючи на парадоксальність ситуації, коли в державі накопичуються нормативні акти з регламентації діловодства, які вже наперед приречені входити в протиріччя із майбутнім законом, якщо він буде прийнятий [7]. Насправді, складно сказати, чи здатен закон про діловодство сутнісно вдосконалити цю систему, яка тримається на низці спеціалізованих законів та численних постановках Кабінету Міністрів України та відомчих інструкціях.

В. Кудлай привертає увагу до проблеми узгодженості діловодної та документознавчої термінології, зокрема, на «суперечності визначення понять з однаковою назвою» в українських нормативних документах, закликаючи переглянути чинні термінологічні стандарти із урахуванням міжнародного досвіду [6, с. 34].

Спробуємо визначити компоненти ідеального діловодства, спираючись як на теоретичні доробки радянських документознавців, так і на праці сучасних українських авторів. Отже, йдеться про такі речі як:

- 1) ретельне планування (ефективне управління документацією починається з

планування завдань і дій, які необхідно виконати). Сюди входить визначення основних цілей, встановлення часових меж і розподіл наявних ресурсів;

2) структурована організація даних (важливо забезпечити систематизацію документів та інформації, щоб вони були доступні та зрозумілі всім співробітникам);

3) автоматизація процедур (застосування програмного забезпечення та сучасних технологій для автоматизації рутинної роботи може значно підвищити продуктивність);

4) оптимізація часу (ефективне управління часом є важливим аспектом якісного діловодства). Сюди входить встановлення пріоритетів, усунення непотрібних затримок і розумний розподіл часу між завданнями;

5) підвищення кваліфікації працівників (постійне навчання та розвиток співробітників допомагає їм покращувати свої навички, що позитивно впливає на ефективність роботи з документацією);

6) злагоджена комунікація (налагодження ефективної взаємодії між працівниками та підрозділами є важливою складовою оптимального діловодства, що дозволяє уникати помилок та покращувати координацію);

7) оцінка результатів (регулярний контроль і аналіз виконаної роботи дозволяє виявляти проблемні моменти та оперативно їх усувати);

8) безперервне вдосконалення (ефективне діловодство вимагає постійного оновлення процесів і методів). Це може включати впровадження інноваційних технологій або перегляд процедур;

9) адаптивність (організація повинна бути здатною швидко реагувати на зовнішні зміни, що дозволяє ефективно керувати документацією);

10) орієнтація на якість (метою діловодства є не тільки своєчасне виконання завдань, а й забезпечення точності, надійності та відповідності стандартам).

Тож недоліки сучасної системи документообігу та документаційного забезпечення управління (ДЗУ), що

позначається на ефективності роботи установ, є наступними:

1) відмова від визнання позитивного впливу ЄДСД та ЄДСДЗУ на діловодство як застарілої радянської спадщини (чинна нормативна база у сфері ДЗУ поширюється на недержавні організації лише в якості рекомендацій; такі установи самостійно обирають оптимальний спосіб організації документообігу);

2) зниження рівня наукових досліджень у сфері документознавства (це відображає загальну тенденцію в гуманітарних науках, частково обумовлену надмірним державним втручанням);

3) зменшення ролі архівних органів у методичному керівництві ДЗУ (що може мати позитивний аспект, адже архіви орієнтовані більше на зберігання, ніж на оперативність);

4) впровадження комп'ютерних технологій у діловодство не супроводжується належними науковими дослідженнями в галузі документознавства (практика випереджає теорію);

5) науково-методичне забезпечення управління документацією не відповідає сучасним вимогам;

6) недосконалість процесів обробки, функціонування а також поточного та архівного зберігання документів (це зумовлено кризою традиційної архівної системи, яка ще не адаптувалася до вимог інформаційного або технотронного суспільства, як і бібліотечна сфера);

7) відставання у стандартизації форм документів (стандартизація не має бути самоціллю: уніфікація повинна оцінюватися з точки зору витрат, оперативності, зручності тощо).

Говорити про існування в установі системи діловодства можна, на наш погляд, у тому випадку, якщо:

– організовано документообіг, тобто рух документів з моменту їх створення чи надходження в установу до завершення виконання та/або відправлення чи передачі у справу на зберігання;

- налагоджено систему реєстрації та обліку документів (що надходять, внутрішніх, вихідних);

- виконані документи розміщуються на зберігання відповідно до номенклатури справ.

Хоча, безумовно, це далеко не все, що потрібно для ефективної організації роботи з документами. Можна сміливо сказати, що це мінімальний комплекс елементів, який дозволяє говорити про наявність діловодства у створенні організаційної структури.

Організація документообігу у документальному забезпеченні установи – одна із найважливіших ділянок діяльності. Документообіг охоплює всю послідовність переміщень документів в апараті управління, в ході яких здійснюються операції з прийому, передачі, розгляду, підготовки, оформлення та надсилання документів.

Раціонально організований документообіг забезпечує оперативне проходження документів найкоротшим шляхом із мінімальними витратами часу. Які заходи тут мають передбачатися?

1) Централізація роботи з документами: всі операції з прийому та відправки документів здійснюються через єдину службу діловодства або відповідний підрозділ.

2) Уникнення непотрібних повернень: документи повинні проходити процес обробки в одному напрямку, без повернення на доопрацювання.

3) Попередній аналіз вхідної документації: перед тим як передати документи на затвердження, слід оцінити їх важливість і актуальність.

4) Єдина реєстрація: документу присвоюється один реєстраційний номер, який використовується протягом усього його обігу в установі.

5) Чіткі резолюції: резолюції повинні точно визначати відповідального виконавця, зміст завдання та термін його виконання.

6) Скорочення узгоджень: слід уникати зайвих погоджень, впроваджуючи

паралельне узгодження для зменшення часу обробки.

7) Делегування права підпису: керівництво може надавати право підписання документів заступникам або керівникам підрозділів, щоб скоротити маршрути документообігу та зменшити час обробки.

8) Розподіл завдань: технічні операції виконуються молодшим або допоміжним персоналом, а більш складні – фахівцями.

9) Організація потоків документів: упорядкування та раціональний розподіл документів у межах установи.

10) Відокремлення документів: виокремлення тих, які підлягають обов'язковій реєстрації, від нерегульованих документів.

Вагомим аспектом пошуку «ідеального» діловодства є економічний ефект від впровадження якісних та оптимізованих систем документообігу. На комерційному підприємстві він може проявлятися у кількох аспектах.

Оптимізовані системи документообігу дозволяють зменшити час на виконання рутинних операцій, таких як пошук, обробка та зберігання документів. Це дозволяє співробітникам зосередитися на важливіших завданнях, що сприяє підвищенню загальної продуктивності.

Перехід на електронні документи та автоматизовані системи діловодства дозволяє зменшити витрати на папір, друк, архівування та фізичне зберігання документів. Зниження таких витрат безпосередньо впливає на скорочення операційних витрат.

Оптимізовані системи забезпечують швидкий доступ до актуальної інформації, що дозволяє керівникам швидше ухвалювати рішення на основі даних. Це особливо важливо у швидкозмінних ринкових умовах.

Стандартизація та автоматизація діловодства сприяють зниженню кількості помилок при обробці документів. Завдяки чіткій системі контролю документообігу зменшується ризик втрати важливої

інформації або виникнення помилок через людський фактор.

Автоматизовані системи допомагають компаніям дотримуватися нормативно-правових вимог, зокрема щодо зберігання та обробки документів. Це дозволяє уникнути можливих штрафів та санкцій за порушення правил документообігу.

Сучасні електронні системи діловодства забезпечують вищий рівень захисту даних завдяки шифруванню, аутентифікації користувачів та контролю доступу до конфіденційних документів. Це мінімізує ризик витоку інформації або несанкціонованого доступу до важливих даних.

І нарешті, інтегровані системи дозволяють поліпшити внутрішню комунікацію та обмін інформацією між відділами, що сприяє ефективнішій координації та спільній роботі над проєктами.

Загалом, застосування якісних і оптимізованих систем діловодства та документообігу допомагає підприємству стати більш ефективним, конкурентоспроможним та адаптованим до сучасних бізнес-викликів.

Висновки

Ефективний документообіг є не просто технічною функцією, а важливим стратегічним інструментом управління, який

впливає на якість роботи всієї організації. Він забезпечує: системність у роботі, контрольованість процесів, захист інтересів усіх учасників, підвищення загальної ефективності діяльності установ, організацій та підприємств.

Ефективне діловодство та документообіг вимагають визначення функцій і відповідальності співробітників, а також поєднання електронного та паперового документообігу. Для оптимального діловодства потрібне планування, організація інформації, автоматизація процесів та оптимізація часу. Важливими є також навчання, комунікація, контроль і гнучкість. Однак, сучасна система документообігу в Україні має недоліки, серед яких відмова від позитивних аспектів попередніх систем, недостатнє наукове підґрунтя для розвитку комп'ютерних технологій, різні проблеми щодо тривалого зберігання документів. Для покращення ситуації потрібно централізувати операції, оптимізувати маршрути, запровадити попередній розгляд документів та делегування деяких функцій молодшому персоналу. Ефективне діловодство потребує постійної адаптації та балансу між стандартизацією та гнучкістю. Для досягнення оптимального рівня потрібен комплексний підхід, що враховує традиційні методи та сучасні технології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Верительник С. Діловодство та документообіг. URL: <https://repository.mu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6040>
2. Загорецька О. Аналіз структури і змісту основних локальних нормативних документів служби діловодства. *Студії з архівної справи та документознавства*. Київ, 2015. Т. 22–23. С. 72–80.
3. Загорецька О. Новий національний стандарт України на оформлення організаційно-розпорядчої документації : історія розроблення, аналіз основних змін і питання впровадження стандарту. *Наукові праці Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського*. Вип. 65. Київ, 2022. С. 85–103.
4. Кудлай В. Сучасний стан розвитку термінології документаційного забезпечення системи управління якістю на підприємстві. *Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія*. 2011. № 1. С. 27–35.
5. Лепетан І. Організація діловодства в управлінській діяльності підприємства. *Економіка та суспільство*. 2022. № 39. 8 с. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-49>.
6. Палеха Ю. Організація сучасного діловодства : навч. посіб. Київ, 2007. 194 с.
7. Сокур Л. Нормативне та науково-методичне забезпечення державної політики України в сфері діловодства. *Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія*. 2011. № 1. С. 16–27.
8. Типова інструкція з діловодства у центральних органах виконавчої влади, Раді міністрів Автономної Республіки Крим, місцевих органах виконавчої влади : Затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 30 листопада 2011 р. № 1242. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1242-2011-%D0%BF#Text>.
9. Ульяновська О. В. Організація документообігу в судах: сучасний стан та шляхи. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія : Право*. Ужгород, 2014. Вип. 26. С. 184–187.

REFERENCES

1. Vertyelnik S. *Dilovodstvo ta dokumentoobih* [Clerkship and document management]. URL: <https://repository.mu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6040>. (in Ukrainian).
2. Zahoretska O. *Analiz struktury i zmistu osnovnykh lokalnykh normatyvnykh dokumentiv sluzhby dilovodstva* [Analysis of the structure and content of the main local regulatory documents of the office administration]. *Studii z arkhivnoi spravy ta dokumentoznavstva* [Studies on archival affairs and document science]. Kyiv, 2015, vol. 22–23, pp. 72–80. (in Ukrainian).
3. Zahoretska O. *Novyi natsionalnyi standart Ukrainy na oformlennia orhanizatsiino-rozporiadchoi dokumentatsii : istoriia rozroblennia, analiz osnovnykh zmin i pytannia vprovadzhennia standartu* [New national standard of Ukraine for the design of organizational and administrative documentation : history of development, analysis of the main changes and issues of implementation of the standard]. *Naukovi pratsi Natsionalnoi biblioteky Ukrainy imeni V.I. Vernadskoho* [Scientific works of the National Library of Ukraine named after V.I. Vernadskyi]. No. 65, Kyiv, 2022, pp. 85–103. (in Ukrainian).
4. Kudlai V. *Suchasnyi stan rozvytku terminolohii dokumentatsiinoho zabezpechennia systemy upravlinnia yakistiu na pidpriemstvi* [The current state of development of the terminology of the documentation support of the quality management system at the enterprise]. *Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia* [Bibliotekaznavstvo. Documentary science. Informatology]. 2011, no. 1, pp. 27–35. (in Ukrainian).
5. Lepetan I. *Orhanizatsiia dilovodstva v upravlinskii diialnosti pidpriemstva* [Organization of clerical work in the management activity of the enterprise]. *Ekonomika ta suspilstvo* [Economy and Society]. 2022, no. 39, 8 p. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-49> (in Ukrainian).
6. Palekha Yu. *Orhanizatsiia suchasnoho dilovodstva : navch. posib.* [Organization of modern office management: tutorial]. Kyiv, 2007, 194 p. (in Ukrainian).
7. Sokur L. *Normatyvne ta naukovo-metodychne zabezpechennia derzhavnoi polityky Ukrainy v sferi dilovodstva* [Normative and scientific-methodical support of the state policy of Ukraine in the field of business administration]. *Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia* [Bibliotekaznavstvo. Documentary Science. Informatology]. 2011, no. 1, pp. 16–27. (in Ukrainian).
8. *Typova instrukttsiia z dilovodstva u tsentralnykh orhanakh vykonavchoi vlady, Radi ministriv Avtonomnoi Respubliky Krym, mistsevykh orhanakh vykonavchoi vlady* [Standard instructions for record keeping in the central bodies of executive power, the Council of Ministers of the Autonomous Republic of Crimea, local bodies of executive power]. Approved by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 30, 2011, no. 1242. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1242-2011-%D0%BF#Text>. (in Ukrainian).
9. Ulianovska O.V. *Orhanizatsiia dokumentoobihu v sudakh : suchasnyi stan ta shliakhy* [Organization of document circulation in courts : current state and ways]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu* [Scientific Bulletin of the Uzhgorod National University]. Uzhhorod, 2014, vol. 26, pp. 184–187. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.10.2024.

UDC 519.6:626.86

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.135.1121

NUMERICAL MODELING OF GROUNDWATER DYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOZACHYNA V.A.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KIRICHENKO P.S.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOZACHYNA V.V.^{4*}, *Postgrad. Stud.*,
KAIDASH M.D.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Department of Natural Sciences and General Engineering Disciplines, LLC "Technical University "METINVEST POLYTECHNIC", 80, Southern Highway, Zaporizhzhia, 69008, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

³ Department of Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation, Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusevich Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, tel. +38 (056) 409-06-06, e-mail: pasha_129@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0793-9593

^{4*} Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: kozachyna.valeriia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7433-7306

⁵ Department of Natural Sciences and General Engineering Disciplines, LLC "Technical University "METINVEST POLYTECHNIC", 80, Southern Highway, Zaporizhzhia, 69008, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: mykhailo.kaidash@mipolytech.education, ORCID ID: 0000-0001-9378-4251

Abstract. Problem statement. Groundwater is undergoing significant anthropogenic impact in many countries around the world. This impact results in changes in groundwater levels and deterioration of their quality. Protecting groundwater from anthropogenic impact involves solving several important tasks. A significant number of tasks are related to the need to predict the processes of filtration and heat and mass transfer in underground flows. In this regard, it is important to have specialized mathematical models as a modern scientific research tool. It should be noted that the use of physical experiments for problems of this class is significantly limited, due to the high cost of equipment, considerable time spent on setting up and conducting the experiment. **The purpose of the article.** Development of a set of numerical models for simulation of filtration and heat and mass transfer processes in groundwater. **Methodology.** To model the process of non-pressure flow of groundwater, the equation of non-pressure filtration is used. The two-dimensional equation of convective-diffusive movement of a pollutant is used to model the process of mass transfer of an impurity in groundwater. To model the process of heat transfer in groundwater, in the problem of groundwater freezing, a two-dimensional energy equation is used. For numerical integration of modeling equations, finite-difference schemes are used. **Scientific novelty.** Numerical models of filtration and heat and mass transfer processes have been developed that allow real-time analysis of changes in groundwater quality and thermal regime. **Practical significance.** The developed numerical models make it possible to quickly analyze non-stationary processes of heat and mass transfer in groundwater when developing drainage systems in flooded areas. **Conclusions.** Numerical models of filtration and heat and mass transfer in groundwater have been developed. For the practical use of the built models, standard hydrological information is required. The models make it possible to analyze the dynamics of ice formation in groundwater during the implementation of the technology of freezing groundwater flow.

Keywords: *filtration; groundwater; mathematical modeling; heat and mass transfer; groundwater freezing*

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КОЗАЧИНА В. А.², *канд. техн. наук, доц.*,
КІРІЧЕНКО П. С.³, *канд. техн. наук, доц.*,
КОЗАЧИНА В. В.^{4*}, *асп.*,
КАЙДАШ М. Д.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра гідраліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Кафедра природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНБЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, 69008, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

³ Кафедра теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляції, Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Україна, тел. +38 (056) 409 06 06, e-mail: pasha_129@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0793-9593

^{4*} Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: kozachyna.valeriia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7433-7306

⁵ Кафедра природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНБЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, 69008, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: mykhailo.kaidash@mipolytech.education, ORCID ID: 0000-0001-9378-4251

Анотація. Постановка проблеми. Підземні води зазнають значного антропогенного навантаження в багатьох країнах світу. Наслідком такого навантаження є зміна рівня ґрунтових вод, погіршення їх якості. Захист підземних вод від антропогенного навантаження включає рішення декількох важливих задач. Значна кількість задач пов'язана з необхідністю прогнозування процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних потоках. У зв'язку з цим важливо мати спеціалізовані математичні моделі як сучасний інструмент наукового дослідження. Слід зазначити, що використання фізичного експерименту для задач даного класу суттєво обмежено, що пов'язано зі значною вартістю обладнання, значними витратами часу на постановку та проведення експерименту. **Мета роботи** – створення комплексу чисельних моделей для моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в ґрунтових водах. **Методика.** Для моделювання процесу руху безнапірного потоку підземних вод використовується рівняння безнапірної фільтрації. Для моделювання процесу масопереносу домішки в підземних водах використовується двовимірне рівняння конвективно-дифузійного руху забруднюючої речовини. Для моделювання процесу теплопереносу в підземних водах, в задачі про заморожування підземних вод, використовується двовимірне рівняння енергії. Для числового інтегрування моделюючих рівнянь використовуються кінцево-різницеві схеми. **Наукова новизна.** Розроблено чисельні моделі процесів фільтрації та тепломасопереносу, що дозволяють в режимі реального часу аналізувати зміну якості та теплового режиму підземних вод. **Практична значимість.** Розроблені чисельні моделі дають можливість швидко аналізувати нестационарні процеси тепломасопереносу в підземних водах при розробці систем дренажу на підтоплених територіях. **Висновки.** Побудовано чисельні моделі фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах. Для практичного використання побудованих моделей потребується стандартна гідрологічна інформація. Моделі дають можливість аналізувати динаміку формування льоду в підземних водах при реалізації технології заморожування потоку підземних вод.

Ключові слова: фільтрація; підземні води; математичне моделювання; тепломасоперенос; заморожування підземних вод

Problem statement. In many countries of the world, the problem of flooding is very acute. Such flooding has significant negative consequences: groundwater gets into basements and building foundations, it is impossible to carry out agricultural work, and there is a decrease in land fertility [3; 6–7].

In addition, lowering the groundwater level is necessary during the construction of a number of structures [1]. Therefore, considerable attention is paid to this problem. Nowadays, various methods of lowering the groundwater level are used. Often, drill bits are used to solve this problem [1]. The method of freezing a groundwater area with subsequent pumping of water from this area is also widely used.

For this purpose, special equipment is used (Fig. 1) and wells that provide a constant mode

of refrigerant supply to the flow where cooling is carried out (Fig. 2) [5; 10; 14].

A particularly important problem in this area is the development of calculation methods for analyzing the effectiveness of various engineering technologies for lowering groundwater levels.

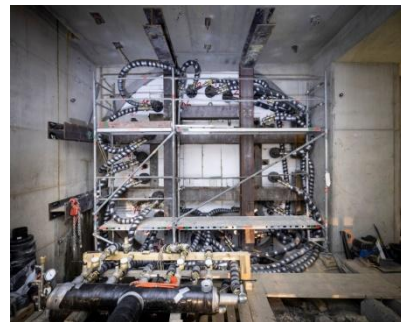


Fig. 1. Special equipment for refrigerant supply to groundwater (<https://cutt.ly/3eHG9as9>)

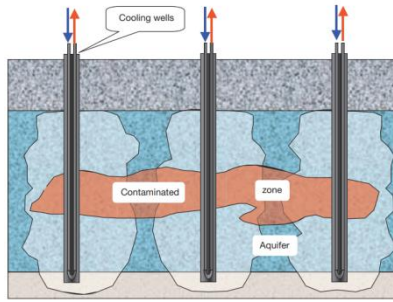


Fig. 2. Wells with refrigerant in the ground water [15]

The most widely used empirical and analytical calculation methods for problems of this class make it possible to predict the processes of geomigration, heat transfer and groundwater dynamics during the operation of drainage systems, etc. However, the use of such methods allows obtaining information only for “simplified” scenarios. High requirements for forecast data require the creation of more advanced mathematical models for solving complex problems in the field of groundwater dynamics and heat and mass transfer processes in them. An alternative is to use numerical models [2; 8–9; 13]. However, the problem of developing fast-calculating numerical models for analyzing complex processes of groundwater dynamics and heat and mass transfer processes in them will remain relevant.

The purpose of the article. Development of a set of mathematical models for calculating groundwater filtration and heat and mass transfer processes in terms of solving engineering problems of groundwater protection.

Methodology. To calculate the dynamics of groundwater and the processes of heat and mass transfer in them, the fundamental equations of the mechanics of the whole medium are used.

Modeling of the filtration process. The Boussinesq's equation is used to describe the motion of the free-flowing groundwater:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

where h is the depth of a non-pressure groundwater flow; k is the aquifer filtration coefficient; μ is the saturation deficit (water yield); h_m is the average depth of the groundwater flow.

When using equation (1), the water resistance is assumed to be horizontal.

The components of the groundwater flow velocity vector are calculated on the basis of Darcy's law:

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v = -k \frac{\partial h}{\partial y}. \quad (2)$$

The boundary conditions for the modeling equation (1) are discussed in [3].

It should be noted that for real problems of groundwater dynamics, the solution of the filtration equation (1) can be found only by using numerical methods. The numerical solution of this equation is discussed below.

Modeling the process of geomigration. A significant number of problems in the field of groundwater dynamics are related to the analysis of the movement of impurities in these waters. Contaminants can enter the groundwater flow during the filtration of contaminated water from storage tanks, during accidental spills, etc. Therefore, there is often a problem of determining the size and intensity of contamination zones in groundwater that form over time. To study the processes of contaminant movement in groundwater, we use the mass transfer equation averaged over the depth of the flow [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (3)$$

where u, v are components of the groundwater flow velocity; S is the concentration of an impurity in the groundwater flow; Q is the intensity of the impurity emission into the groundwater flow; μ_x, μ_y are dispersion coefficients; t is time.

The position of the emission source (sedimentation pond) is modeled using the Dirac delta function $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$, where x_i, y_i are the Cartesian coordinates of the emission source.

The setting of boundary conditions for equation (3) is discussed in [2].

Modeling the process of heat transfer in groundwater. To model the process of freezing groundwater and calculate the dynamics of changes in its temperature, we use the following heat transfer equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (4)$$

where u , v are the components of the groundwater flow velocity; T is the temperature in the flow; a_x , a_y are the thermal conductivity coefficients; t is time.

To model the hydrodynamics of groundwater flow in problems of its freezing, we propose to use the velocity potential equation:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

where P is the velocity potential.

If the velocity potential field is defined, then the components of the flow velocity vector are defined as follows:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (6)$$

Solving equation (5) and determining the components of the groundwater flow velocity vector based on dependencies (6) make it possible to determine the groundwater flow rate during the formation of a cooling zone (ice) near wells that use a special solution for cooling water.

Numerical models. For the numerical integration of the considered modeling equations, we use a rectangular difference grid.

When constructing numerical models, their parameters on the difference grid are determined as follows:

1) the depth of the underground flow is determined

at the centers of the difference cells;

2) the concentration of the impurity is determined at the centers of rectangular difference cells;

3) the components of the filtration flow rate are determined on the sides of the difference cells;

4) the temperature of the water flow is determined in the centers of rectangular difference cells.

We form the appearance of the computational domain using markers. The markers determine the position of wells, rivers (groundwater discharge zone), liquid waste storage facilities, etc.

To construct a numerical model of the filtration flow, we reduce equation (1) to the following form:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right); \quad (7)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = W. \quad (8)$$

To numerically solve equation (7), we use a difference scheme of total approximation:

– the first step of splitting:

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

– the second step of splitting:

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

where $a = \frac{kh_m}{\mu}$.

To numerically solve the geomigration equation (3), we decompose it as follows [1]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (11)$$

To numerically solve equation (9), we apply a two-step splitting scheme [2]:

– in the first step:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2};$$

– in the second step:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

where $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$; $u^- = \frac{u - |u|}{2}$.

To numerically solve equation (10), we apply the following two-step splitting scheme [2]:

– in the first step:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2};$$

– in the second step:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

where $v^+ = \frac{v + |v|}{2}$; $v^- = \frac{v - |v|}{2}$.

To numerically integrate equation (11), we use the Euler method.

It should be noted that the solution of the flow freezing problem is one of the most difficult problems of groundwater dynamics. This is due to the fact that it is necessary to search for a solution (temperature field, groundwater flow velocity) in a region whose appearance changes over time due to the

appearance of a freezing zone, i. e., a zone where there is no fluid movement. Thus, a zone appears in the flow that is impermeable and changes its size and shape over time.

When solving problems related to the process of freezing a groundwater flow, the first step is to numerically integrate the Laplace equation using an explicit formula. To do this, we perform the following approximation of the derivatives:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2};$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2},$$

where $\Delta x, \Delta y$ is the step of the difference grid in the direction of the OX, OY axes, respectively.

Taking these approximations into account, the Laplace equation can be written as follows:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0.$$

The value of the velocity potential is determined as follows:

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

where $Z = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)$.

The splitting of equation (4) has the form [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial v T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (13)$$

To numerically solve equation (12), we apply a two-step splitting scheme [2]:

– in the first step:

$$T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = T_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} +$$

$$+\Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2};$$

– in the second step:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- T_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} +$$

$$+\Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

where $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$; $u^- = \frac{u - |u|}{2}$.

To numerically solve equation (13), we apply the following two-step splitting scheme [2]:

– in the first step:

$$T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = T_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} +$$

$$+\Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2};$$

– in the second step:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- T_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} +$$

$$+\Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

where $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$; $u^- = \frac{u - |u|}{2}$.

The algorithm for solving problems of this class is as follows:

1. Form a view of the computational domain.
2. Enter information about the physical parameters of the problem.
3. Set the position of the wells used to freeze the underground flow.
4. Solve the Laplace equation for the velocity potential.
5. Determine the components of the flow velocity vector.
6. Calculate the temperature field in the flow.

7. Determine the region where the flow temperature is 0, i. e., water freezing has occurred.

The appearance of ice in the flow changes the geometry of the computational domain, since there is no longer any water movement in the area where there is ice. Therefore, it is necessary to solve the problem of groundwater dynamics again and determine the groundwater flow velocity field again, and then solve the heat transfer problem. That is, the process is repeated starting from step 4.

The computer code WaTGE-2 was created on the basis of the developed numerical models. The programming language is FORTRAN. The computer code includes:

- 1) Wa.DAT – a file of initial data (entering information on the size of the calculated area, the location of the pollution source, the concentration of impurities in the underground flow, the position of wells, etc);
- 2) Wa1 – a SUBROUTINE-type subroutine for calculating the dynamics of groundwater depth change over time;
- 3) Wa2 – SUBROUTINE subroutine for calculating the components of the filtration flow rate;
- 4) Wa3 – SUBROUTINE subroutine for calculating the change in the concentration of impurities in groundwater over time;
- 5) WaT3 – SUBROUTINE subprogram for calculating the change in temperature concentration in groundwater over time;
- 6) WaTV2 – a SUBROUTINE subroutine for calculating the components of the flow velocity used in solving the heat transfer problem;
- 7) WaTR2 – a SUBROUTINE subroutine for solving the velocity potential equation.

Results. A computational experiment was conducted to verify the stability of the calculation of the developed numerical models for simulating the process of groundwater freezing. Two wells were considered (Fig. 3, marker 4), where a constant temperature of 0 °C was maintained. The ambient temperature was 20 °C. It was necessary to determine the dynamics of the freezing zone formation. It was assumed that in the difference cell where the

temperature became 0 °C, ice formed and this zone ceased to be a flow zone.

Figures 3–7 show the freezing area which was formed in the groundwaters flow during time. Time in these figures is dimensionless. These figures show the change in the shape of the freezing zone in the flow.

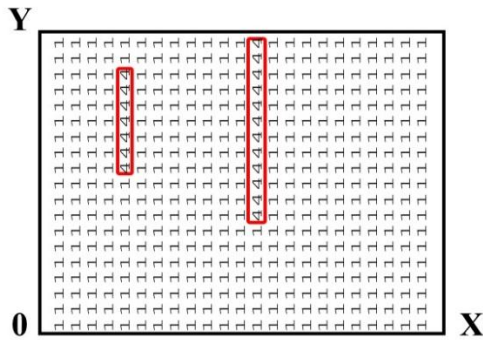


Fig. 3. Scheme of the computational domain:
4 – position of the well supplying the freezing agent

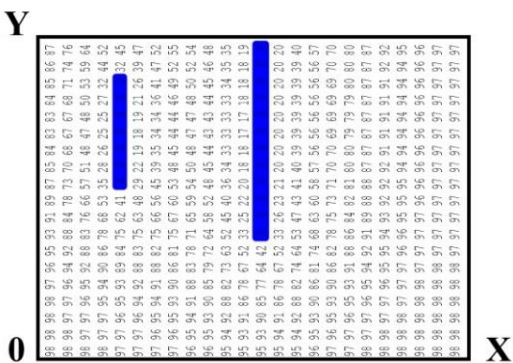


Fig. 4. Freezing area for time $t = 0.7$

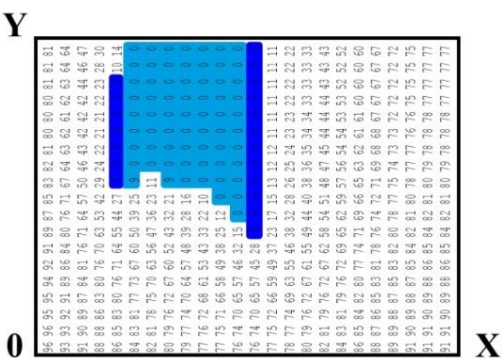


Fig. 5. Freezing area for time $t = 2.1$

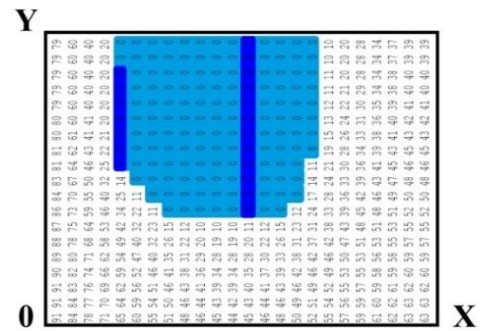


Fig. 6. Freezing area for time $t = 4.9$

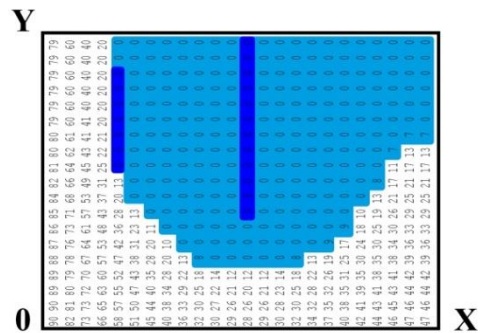


Fig. 7. Freezing area for time $t = 6.3$

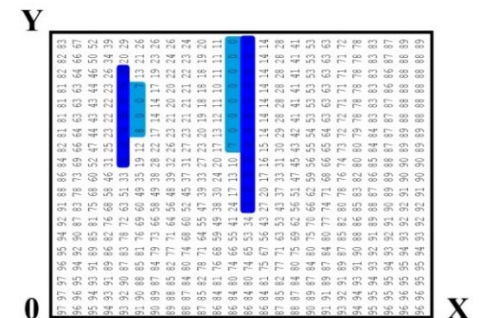


Fig. 8. Freezing area for time $t = 1.4$

As can be seen from the figures above, the developed numerical model allows us to determine dimensions of freezing zone and shape of the cooling zone during freezing operation.

Note that the calculation time for each variant of the problem is 8 s.

Scientific novelty and practical value. Effective mathematical models for predicting the level of chemical contamination of groundwater, groundwater dynamics, and thermal regime in groundwater are proposed.

The constructed mathematical models make it possible to determine the dynamics of changes in the temperature regime of

groundwater during the operation of wells used for freezing individual sections of groundwater.

The developed computer program allows for a comprehensive assessment of groundwater conditions.

Conclusions

1. A set of mathematical models has been developed to calculate the process of filtration of unconfined groundwater and its chemical contamination.

2. An experiment was carried out to confirm the adequacy of the constructed numerical model of filtration of the free-flowing groundwater flow.

3. An effective mathematical model was constructed that allows determining the temperature fields in groundwater during the operation of wells used to freeze individual sections of the flow.

4. The results of computer modeling indicate the effectiveness of the developed mathematical models.

REFERENCES

1. DSTU-N B V.1.1-38:2016. *Nastanova shchodo inzhenernoho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia* [DSTU-N B V.1.1-38:2016 Guidelines on engineering protection of territories, buildings and structures against flooding and inundation]. Kyiv : SE "State Research Institute of Building Structures", 2017, 135 p. (in Ukrainian).
2. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K. and Belyaev N.N. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
3. Kremez V.S., Buts Y.V. and Tsybal V.A. *Modelyuvannya protsesu pidtoplennya terytoriy v zoni vplyvu vodoskhovyshch. Lyudyna ta dovkillya* [The modelling of process of flooding by subsoil waters is in the affected of reservoirs zone. Man and environment]. *Problemy neoekolohiyi* [Issues of Neoecology]. 2012, no. 1–2, pp. 128–130. (in Ukrainian).
4. Rudakov D.V. *Matematychni metody v okhoroni pidzemnykh vod* [Mathematical methods in groundwater protection]. Dnipropetrovsk : National Mining University Publ., 2012, 158 p. (in Ukrainian).
5. Tiutkin O.L. & Miroshnyk V.A. *Porivnyal'nyy analiz spetsial'nykh sposobiv pid chas prokhodky vertykal'nykh vyrobok* [Comparative analysis of special methods during vertical works]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka* [Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice]. 2020, no. 17, pp. 81–90. URL: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205019> (in Ukrainian).
6. Shcherbak O.V., Yakovlev Ye.O. and Dolin V.V. *Modelyuvannya hidroheofil'ratsiynoho polya gruntovykh vod u zoni vplyvu metalurhiynoho vyrobnytstva* [Modeling of hydrogeofiltration groundwater field in the influence zone of metallurgical production]. *Mineral'ni resursy Ukrayiny* [Mineral Resources of Ukraine]. 2018, no. 3, pp. 19–25. URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2018.3.19-25> (in Ukrainian).
7. Cashman P.M. and Preene M. *Groundwater Lowering in Construction. A Practical Guide to Dewatering*. CRC Press, 2020. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003050025>
8. Guangwei Wu, Yulong Dong, Lei Liu, Yingqiang Yao, Yubai Bi, Jian Guo and Sha Gu. In Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW. 2023, vol. 43: Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII, pp. 766774. URL: <https://doi.org/10.3233/atde230795>
9. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model-the ground-water flow process. In Techniques and Methods 6-A16. 2005. URL: <https://doi.org/10.3133/tm6a16>
10. Hong Z., Shi R., Yue F., Yang J. and Wu Y. Mathematical Solution of Temperature Field in Non-Hollow Frozen Soil Cylinder Formed by Annular Layout of Freezing Pipes. *Mathematics*. 2023, no. 11 (8), pp. 1–15. URL: <https://doi.org/10.3390/math11081962>
11. Mustafa S., Bahar A., Aziz Z.A. and Darwish M. Analytical solutions of contaminant transport in homogeneous and isotropic aquifer in three-dimensional groundwater flow. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022, no. 29 (58), pp. 87114–87131. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21402-8>
12. Shaikh B.Y. and Eldho T.I. Analytical modeling of contaminant transport along sloping coastal beaches in presence of tidal waves and exponential rainfall infiltration. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2023, no. 256, art. 104194. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104194>
13. Shakeri R., Nassery H.R. and Ebadi T. Numerical modeling of groundwater flow and nitrate transport using MODFLOW and MT3DMS in the Karaj alluvial aquifer, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022, no. 195, arti. 242. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10881-4>
14. Zhou M.-M., Marwan A. and Meschke G. Modeling and optimization of ground freezing in tunneling. ITA World Tunnel Congress-2015. 2015, pp. 1–12.

15. Remediation of sites with mixed contamination of radioactive and other hazardous substances. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2006.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення [Чинний від 2017-01-04]. КИЇВ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2017. 135 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Кремез В. С., Буц Ю. В., Цимбал В. А. Моделирование процесса подтопления территорий в зоне влияния водосховищ. Людина та довкілля. *Проблеми неоекології*. 2012. № 1–2. С. 128–130.
4. Рудаков Д. В. Математичні методи в охороні підземних вод. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. 158 с.
5. Тютюкін О. Л., Мірошник В. А. Порівняльний аналіз спеціальних способів під час проходки вертикальних виробок. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2020. № 17. С. 81–90. URL: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205019>
6. Щербак О. В., Яковлев Є. О., Долін В. В. Моделирование гидрогеофильтрационного поля грунтовых вод в зоне влияния металлургического производства. *Мінеральні ресурси України*. 2018. № 3. С. 19–25. URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2018.3.19-25>
7. Cashman P. M., Preene M. Groundwater Lowering in Construction. A Practical Guide to Dewatering. CRC Press, 2012. 665 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003050025>
8. Guangwei Wu, Yulong Dong, Lei Liu, Yingqiang Yao, Yubai Bi, Jian Guo, Sha Gu. Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW. 2023. Vol. 43: Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII. Pp. 766–774. URL: <https://doi.org/10.3233/atde230795>
9. Harbaugh A. W. MODFLOW-2005: the U. S. Geological Survey modular ground-water model--the groundwater flow process. *Techniques and Methods 6-A16*. 253 p. URL: <https://doi.org/10.3133/tm6A16>
10. Hong Z., Shi R., Yue F., Yang J., Wu Y. Mathematical Solution of Temperature Field in Non-Hollow Frozen Soil Cylinder Formed by Annular Layout of Freezing Pipes. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Pp. 1–15. URL: <https://doi.org/10.3390/math11081962>
11. Mustafa S., Bahar A., Aziz Z. A., Darwish M. Analytical solutions of contaminant transport in homogeneous and isotropic aquifer in three-dimensional groundwater flow. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29, iss. 58. Pp. 87114–87131. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21402-8>
12. Shaikh B. Y., Eldho T. I. Analytical modeling of contaminant transport along sloping coastal beaches in presence of tidal waves and exponential rainfall infiltration. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2023. Vol. 256. Article 104194. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104194>
13. Shakeri R., Nassery H. R., Ebadi T. Numerical modeling of groundwater flow and nitrate transport using MODFLOW and MT3DMS in the Karaj alluvial aquifer, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 195. Article 242. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10881-4>
14. Zhou M.-M., Marwan A., Meschke G. Modeling and optimization of ground freezing in tunneling. *ITA World Tunnel Congress-2015*. 2015. Pp. 1–12.
15. Remediation of sites with mixed contamination of radioactive and other hazardous substances. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2006.

Надійшла до редакції: 21.10.2024.

УДК 624.012.35, 624.012.35-183.4, 624.012.4-183.2
DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.144.1122

UTILIZATION OF LOCAL MATERIALS FOR PERMANENT FORMWORK PRODUCTION FOR LOW-RISE BUILDING CONSTRUCTION

DIKAREV K.B.^{1*}, *PhD., Assoc. Prof.*,
MOVCHAN O.Yu.², *Postgrad. Stud.*,
PAPIRNYK R.B.³, *PhD., Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Construction Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-22, e-mail: kdikarev@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

² Department of Construction Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-22, e-mail: movchan.olexandr@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-4430-683X

³ Department of Construction Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-22, e-mail: ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-4430-683X

Abstract. Problem Statement. Ukraine’s construction industry has been severely impacted after russian full-scale invasion, with more than 167,000 residential buildings destroyed and a significant reduction in the workforce. Additionally, the country faces a massive accumulation of construction waste due to widespread destruction. Traditional construction methods are labor-intensive and costly, further hindered by the shortage of skilled labor. There is an urgent need for innovative solutions to reduce construction time and costs while addressing environmental sustainability by recycling building debris. **Objective.** This research aims to explore the feasibility of using local materials, such as granite screenings, slag, and recycled concrete, to produce permanent formwork in low-rise building construction. It seeks to evaluate the mechanical properties of these materials through compression and flexural tests, compare the labor and cost efficiency of permanent formwork to conventional systems, and propose methods to optimize the formwork design to reduce construction labor intensity and material costs. **Conclusion.** The study demonstrated that local materials, such as granite screenings can be used for permanent framework production and reducing final costs. Mechanical characteristics of samples from local materials were tested and the research found some correlations between material density and structural strength in part of samples, indicating that higher-density materials can improve durability. This approach presents a cost-effective and environmentally sustainable alternative for Ukraine’s reconstruction efforts, reducing reliance on skilled labor and mitigating the challenges posed by the war-damaged construction sector.

Keywords: *permanent formwork; local materials; granite screenings*

ВИКОРИСТАННЯ ЛОКАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА НЕЗНІМНОЇ ОПАЛУБКИ ДЛЯ ЗВЕДЕННЯ МАЛОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

ДІКАРЕВ К. Б.^{1*}, *канд. техн. наук, доц.*,
МОВЧАН О. Ю.², *асп.*,
ПАПІРНИК Р. Б.³, *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-22, e-mail: kdikarev@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

² Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-22, e-mail: movchan.olexandr@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-4430-683X

³ Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-22, e-mail: ruslan.b.papirnyk@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

Анотація. Вступ. Будівельна галузь України зазнав значних втрат унаслідок повномасштабного військового вторгнення, що призвело до руйнування понад 167 000 житлових будинків і суттєвого скорочення робочої сили. Масштабні руйнування спричинили також значне накопичення будівельних відходів. Традиційні

методи будівництва характеризуються високою трудомісткістю та вартістю, що посилюється дефіцитом кваліфікованих кадрів. Отже, існує нагальна потреба в інноваційних рішеннях, які зможуть зменшити час і витрати на будівництво, одночасно сприяючи екологічній стійкості через переробку будівельних відходів.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є вивчення можливості використання локальних матеріалів, таких як гранітний відсів, шлак, перероблена цегла та бетон, для виготовлення незнімної опалубки та використання її в малоповерховому будівництві. Дослідження передбачає оцінку механічних властивостей зазначених матеріалів шляхом випробувань на стиснення та згин, виготовлення прототипів опалубки та тестування зразків на міцність. Крім того, планується порівняння ефективності праці та вартості незнімної опалубки з традиційними системами, а також розробка методів оптимізації дизайну опалубки для зниження трудомісткості та витрат на будівництво. **Висновки.** Результати дослідження показали, що локальні матеріали, зокрема гранітний відсів, можуть ефективно використовуватися для виготовлення незнімної опалубки, що сприяє зниженню її собівартості. Аналіз механічних властивостей зразків із використанням локальних матеріалів виявив кореляцію між щільністю матеріалу та міцністю конструкції, що свідчить про те, що матеріали з вищою щільністю можуть підвищувати міцність виробів. Запропонований підхід надає економічно вигідну та екологічно стійку альтернативу для відбудови України, зменшуючи залежність від кваліфікованої робочої сили та вирішуючи проблеми, пов'язані з наслідками військових дій у будівельній галузі. Подальші напрями дослідження включають вивчення властивостей інших локальних матеріалів, таких як шлак, перероблена цегла та бетон, порівняння їх механічних характеристик та виготовлення повномасштабних прототипів опалубки.

Ключові слова: незнімна опалубка; локальні матеріали; гранітний відсів

Introduction. According to the Kyiv School of Economics, as of June 2023, the total damage inflicted on Ukraine due to Russian aggression and the full-scale invasion is estimated at \$150.5 billion. This includes more than 167,000 residential buildings and 426 large and medium-sized enterprises [1]. Additionally, IMF data indicates that Ukraine's population decreased by 19 % from 2021 to April 2024 due to military actions and the temporary occupation of territories [2]. This reduction in population proportionally decreases the number of construction industry specialists available in Ukraine.

One approach to reduce construction time is the use of permanent formwork. Permanent formwork consists of blocks or panels made from various materials, which are assembled into a unified monolithic formwork structure. A key characteristic of permanent formwork is that it is not removed after the concrete hardens, but instead remains as an integral part of the structure [3; 6–7].

The main objectives of this research are to:

- Investigate and establish the relevance of using permanent formwork in low-rise construction.
- Conduct a technical and economic comparison of different types of formwork.
- Explore the potential use of local materials to reduce production costs.
- Examine the feasibility of reusing construction waste where applicable.

- Minimize the need for skilled labor.

- Perform compression and flexural tests on samples to determine mechanical properties.

Ukraine ranks first in the world in terms of the volume of waste resulting from destruction. According to official statistics, at least 700,000 tons of construction waste are in areas under Ukrainian control, generated because of Russian aggression. However, experts believe the actual figure is much higher, and by the end of the war, it could increase hundreds of times [4; 5].

To prevent being overwhelmed by construction debris, pilot projects for the disposal and recycling of construction waste have already been initiated. This recycled material has the potential to be used in the reconstruction of Ukraine.

Most recycled building materials can be utilized in the construction of buildings and structures. For example, crushed (sorted by fractions) concrete, brick, and natural or artificial stone can serve as aggregate in concrete or be used in the production of permanent formwork.

Our comparative analysis of using permanent formwork for ceiling installations shows that permanent formwork for floors can reduce the labor intensity of the construction process by an average of 31 % compared to traditional beam-panel formwork. When using permanent beam formwork for floors, labor intensity can be reduced by as much as 44 %.

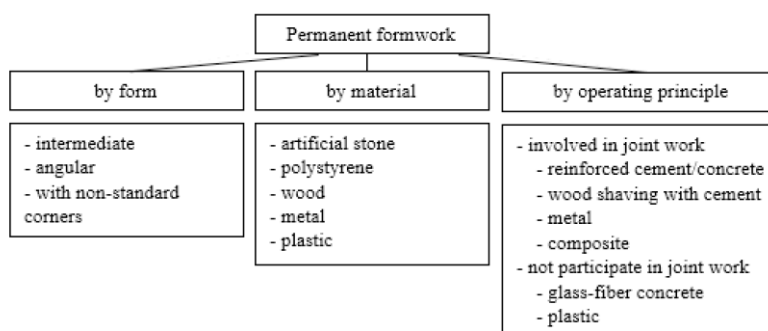


Fig. 1. Permanent formwork classification

The purpose of the work. We plan to focus on studying permanent formwork made from local materials, such as granite screenings and waste slag, or building debris, including recycled concrete and brick.

The main results of the research. We conducted mechanical experiments using

potential materials. For the compression tests, we prepared a total of 20 cubes with dimensions of 100×100×100 mm for each of the three types of materials listed in Table 1. The geometrical characteristics, mass and density are presented in Table 2, the results of the compression tests are presented in Table 3.

Table 1

Mark	Cement, kg	Granite screenings, fraction 0–5, parts	Sand, kg	Number of cubes
1/8.4	25	8.4	30	6
1/9	25	9	30	7
1/9.6	25	9.6	30	7

Table 2

№	Type	a top, mm	b top, mm	S top, mm ²	a btm, mm	b btm, mm	S btm, mm ²	S avg, mm ²	h1, mm	h2, mm	h3, mm	h4, mm	h avg, mm	V, cm ³	mass, g	ρ, kg/m ³
1	1/8.4	100	97	9700	100	98	9800	9750	97	97	98	100	98	956	1810	1894
2	1/8.4	98	97	9506	100	97	9700	9603	98	97	98	99	98	941	1795	1907
3	1/8.4	96	96	9216	97	98	9506	9361	98	98	100	99	99	924	1755	1899
4	1/8.4	97	97	9409	100	98	9800	9605	99	98	100	99	99	951	1805	1898
5	1/8.4	95	100	9500	97	100	9700	9600	98	100	101	98	99	953	1820	1910
6	1/8.4	95	96	9120	95	97	9215	9168	95	97	100	97	97	892	1705	1912
7	1/9	100	106	10600	100	107	10700	10650	100	100	100	98	100	1060	2050	1935
8	1/9	101	105	10605	100	106	10600	10603	100	101	100	98	100	1058	2075	1962
9	1/9	104	104	10816	101	103	10403	10610	101	100	98	100	100	1058	2085	1970
10	1/9	100	95	9500	95	95	9025	9263	105	103	105	100	103	956	1980	2070
11	1/9	100	98	9800	96	98	9408	9604	104	103	99	105	103	987	2005	2032
12	1/9	101	96	9696	101	99	9999	9848	98	101	105	101	101	997	2010	2016
13	1/9	102	95	9690	100	100	10000	9845	100	100	100	101	100	987	1895	1920
14	1/9.6	96	102	9792	100	101	10100	9946	98	98	98	100	99	980	1930	1970
15	1/9.6	98	101	9898	100	98	9800	9849	97	98	99	99	98	968	1920	1984
16	1/9.6	101	98	9898	101	101	10201	10050	98	99	98	101	99	995	1975	1985
17	1/9.6	100	98	9800	101	98	9898	9849	100	95	95	100	98	960	1915	1994
18	1/9.6	100	98	9800	98	100	9800	9800	98	99	99	101	99	973	1920	1974
19	1/9.6	100	98	9800	99	99	9801	9801	95	98	98	95	97	946	1895	2004
20	1/9.6	100	98	9800	100	98	9800	9800	95	95	95	95	95	931	1880	2019

Table 3

№	Type	F, kgf	F, kN	P, kPa	P, MPa	P, MPa (average)
1	1/8.4	3059	30.0	3077	3.08	3.12
2	1/8.4	3100	30.4	3164	3.16	
3	1/8.4	2950	28.9	3088	3.09	
4	1/8.4	3100	30.4	3163	3.16	
5	1/8.4	3030	29.7	3093	3.09	
6	1/8.4	2960	29.0	3164	3.16	
7	1/9	4635	45.4	4265	4.27	4.10
8	1/9	4340	42.5	4012	4.01	
9	1/9	4450	43.6	4110	4.11	
10	1/9	4300	42.1	4550	4.55	
11	1/9	4200	41.2	4286	4.29	
12	1/9	4000	39.2	3981	3.98	
13	1/9	3500	34.3	3484	3.48	3.34
14	1/9.6	3525	34.5	3473	3.47	
15	1/9.6	3420	33.5	3403	3.40	
16	1/9.6	3340	32.7	3257	3.26	
17	1/9.6	3730	36.6	3711	3.71	
18	1/9.6	3840	37.6	3840	3.84	
19	1/9.6	2850	27.9	2850	2.85	
20	1/9.6	2840	27.8	2840	2.84	

Next essential part of experiment was building histograms of size distribution to understand possible errors. We built separate

histograms for each cube type. As it is shown below, dimension errors are up to 7 mm, that is 7 % of standard cube dimension.

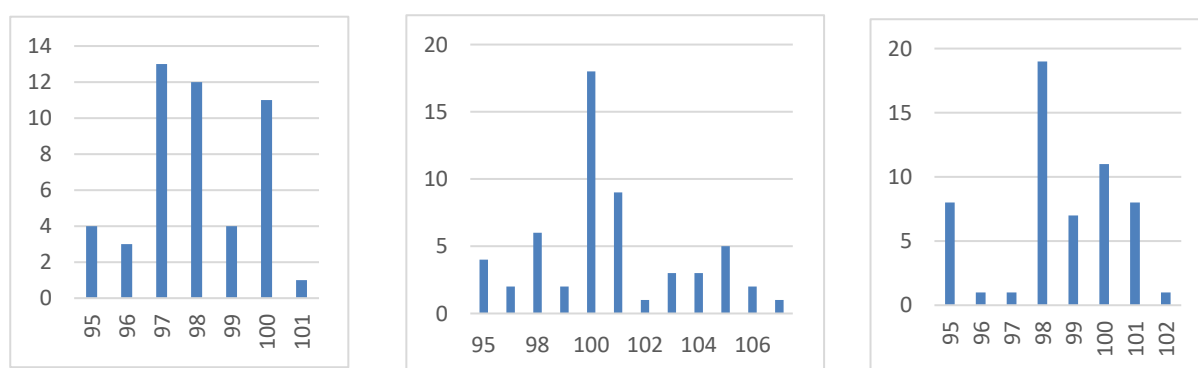


Fig. 2. Distribution of dimensions for samples 1/8.4, 1/9 and 1/9.6



Fig. 3. Part of destroyed samples

We also investigated dependency of destructive pressure, MPa on density kg/m^3 . For samples 1/8.6 the Pearson correlation coefficient is approximately 0.396, that suggests a weak positive correlation between the two variables. Also, p-value is 0.438 that indicates that the correlation is not statistically significant at common significance levels, meaning we cannot confidently assert that the observed relationship isn't due to random chance.

For samples 1/9 Pearson Coefficient is 0.703 that indicates a moderate to strong positive correlation between density and destructive pressure. As the density increases, the destructive pressure tends to increase as well. For this type of samples p-value is 0.078 that is greater than 0.05 but close to it. This means the result is not statistically significant at the conventional 0.05 level, but it does suggest a potential relationship that might become significant with more data points or a larger

sample size. The moderate to strong positive correlation shows a trend that higher densities are associated with higher destructive pressures. However, the p-value of 0.078 implies that there is still some uncertainty, and we can't confidently conclude the relationship is statistically significant with this data alone.

For samples 1/9.6 Pearson Coefficient is -0.761 that indicates a strong negative correlation between density and destructive pressure. As the density increases, the destructive pressure tends to decrease. For this type of samples p-value is 0.047. Since the p-value is less than 0.05, the result is statistically significant. This means the negative correlation is unlikely to be due to random chance, and there is strong evidence of an inverse relationship between the two variables. There is a significant negative relationship between density and destructive pressure, meaning that as density increases, the destructive pressure decreases.

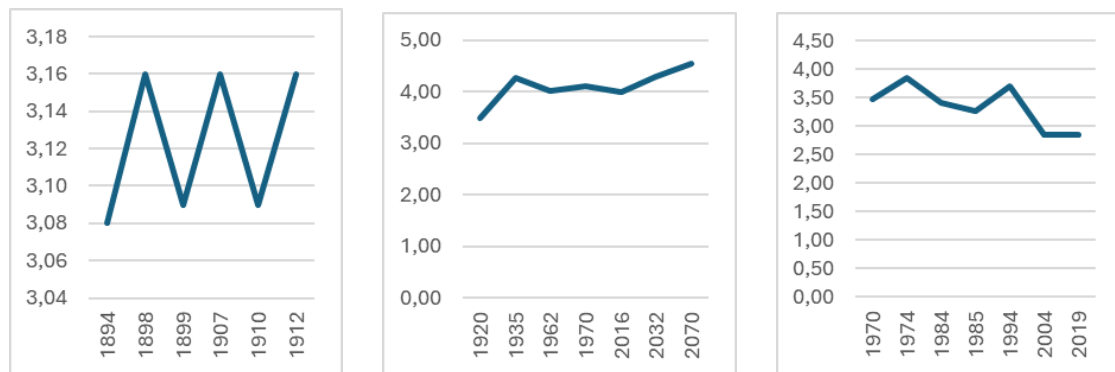


Fig. 4. Dependency of P, MPa on density kg/m^3 for samples 1/8.4, 1/9 and 1/9.6

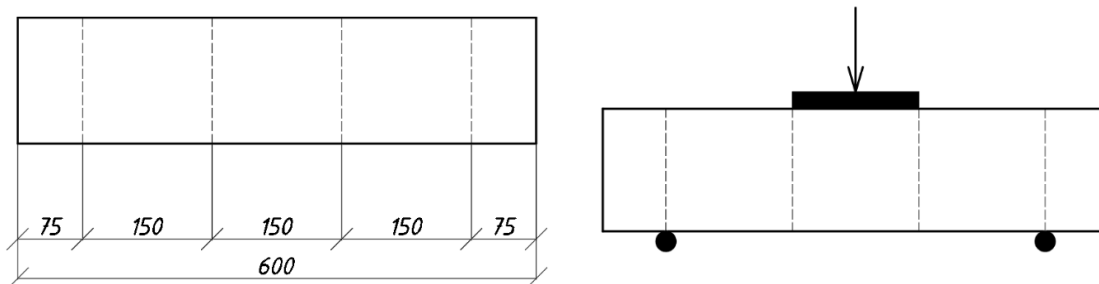


Fig. 5. Scheme of flexural tests performing

We also conducted flexural tests on a total of six beams, each measuring $145 \times 145 \times 600$ mm. Two types of materials were tested, with three beams used for each material type:

1. 1/5 – 1 part of cement : 2 parts of sand : 2 parts of granite screenings of fraction 0–5
2. 1/5a – 1 part of cement : 4 parts of granite screenings of fraction 0–5.

The geometrical characteristics, mass and density are presented in Table 4, the results of

the flexural tests are presented in Table 5.

Table 4

№	Type	a st., mm	b st., mm	S st., mm ²	a end, mm	b end, mm	S st., mm ²	S avg, mm ²	l1, mm	l2, mm	l3, mm	l4, mm	l avg, mm	V, cm ³	mass, g	ρ, kg/m ³
1	1/5	144	145	20880	145	143	20735	20808	601	605	603	598	602	12521	27740	2215
2	1/5	145	145	21025	144	143	20592	20809	599	600	602	601	601	12496	28120	2250
3	1/5	144	144	20736	143	146	20878	20807	600	600	601	601	601	12495	27980	2239
4	1/5a	143	146	20878	144	145	20880	20879	601	600	600	601	601	12538	30700	2449
5	1/5a	145	145	21025	144	144	20736	20881	599	602	598	605	601	12549	29980	2389
6	1/5a	144	145	20880	146	144	21024	20952	600	601	600	599	600	12571	30800	2450

Table 5

№	Type	F, kN	f _{ctk} , MPa	P, MPa (average)
1	1/5	19.4	2.86	2.87
2	1/5	19.6	2.89	
3	1/5	19.5	2.87	
4	1/5a	23.0	3.40	3.33
5	1/5a	21.7	3.21	
6	1/5a	22.9	3.39	

For these beams, we also constructed histograms to analyze the size distribution and assess potential errors. The results show dimensional errors of up to 3 mm for widths (*a* and *b*), which corresponds to 2 % of the standard beam dimensions. Length deviations reached up to 5 mm, representing less than 1% of the total length.

The same as for cubes, we investigated dependency of destructive pressure, MPa on density kg/m³. For the samples 1/5 Pearson Coefficient is 0.921 that indicates a strong positive correlation between density and destructive pressure. As the density increases, the destructive pressure tends to increase. P-value is 0.256 and since the p-value is greater than 0.05, the result is not statistically significant. This means that, although there is a strong correlation, we do not have enough evidence to confidently say that this relationship is not due to random chance, likely due to the small sample size. There is a strong positive correlation between density and destructive pressure in this dataset, but the relationship is not statistically significant due to the small number of data points. More data would be needed to confirm this trend.

For samples 1/5a Pearson Coefficient is 0.998 that indicates an extremely strong positive correlation between density and

destructive pressure. As density increases, destructive pressure also increases almost perfectly in tandem. The p-value is 0.039. As we can see, the p-value is less than 0.05, the correlation is statistically significant. This means there is strong evidence of a real, meaningful relationship between density and destructive pressure. The data shows a very strong positive and statistically significant correlation between density and destructive pressure. This suggests that in this dataset, the increase in density is closely associated with an increase in destructive pressure.

Next, we successfully fabricated a beam formwork with a cross-sectional dimension of 190×190 mm (Fig. 6). The geometric characteristics of the section were determined as follows: cross-sectional area *A* = 183 cm², moment of inertia *I_y* = 5 524 cm⁴, and section modulus *W_y* = 581 cm³. Given an average density of 1 960 kg/m³, the weight of a 600 mm-long formwork is approximately 21.5 kg, which can be handled by a single person.

We then developed a universal model of the section, and the next phase involves optimizing the section to achieve a better *W_y*/mass ratio. Our next objective is to develop multiple universal shapes with optimal

characteristics, aimed at minimizing the setup time for formwork.

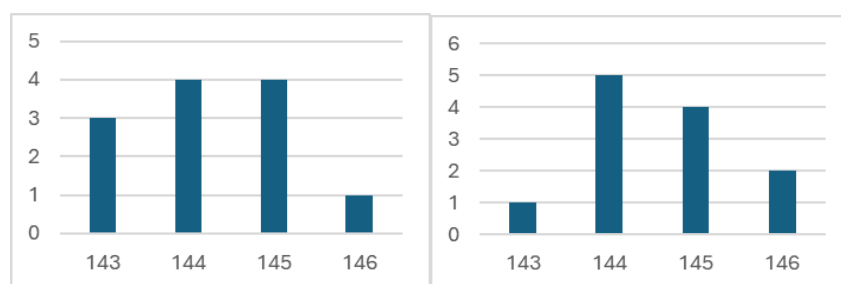


Fig. 6. Distribution of a and b dimensions for samples 1/5 and 1/5a

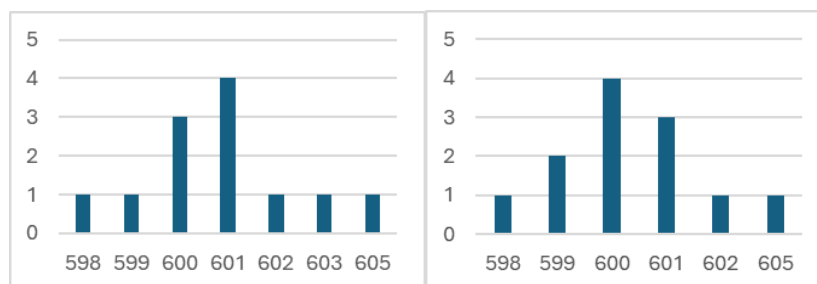


Fig. 7. Distribution of length dimensions for samples 1/5 and 1/5a

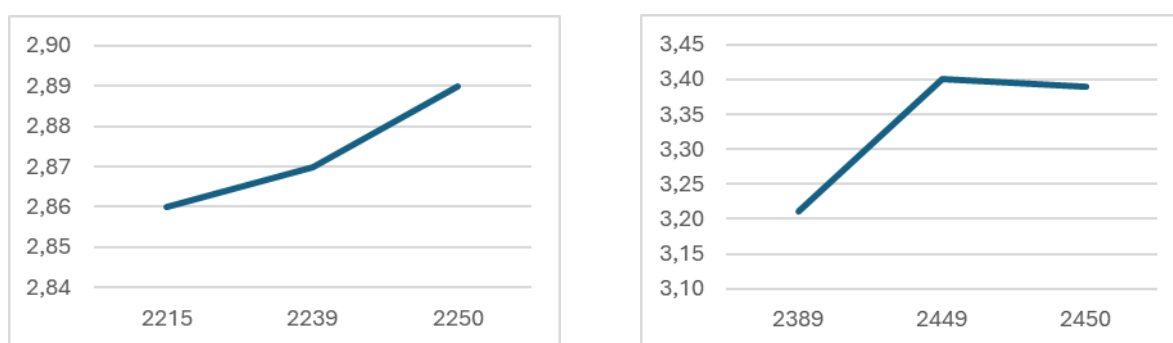


Fig. 8. Dependency of f_{ctk} , MPa on density kg/m^3 for samples 1/5 and 1/5a

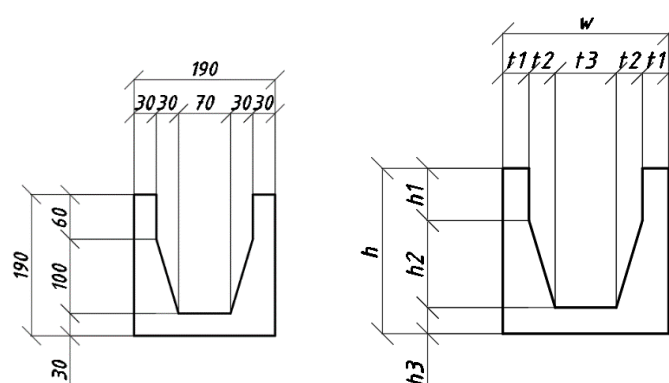


Fig. 9. Sections of beam formwork

Our upcoming experimental objectives are:

- Improve sample quality and minimize dimensional errors to within ± 1 mm.
- Conduct additional tests to gain a deeper understanding of the mechanical properties of

the materials and to achieve better correlation of experimental results.

- Conduct tensile (traction) experiments on prism-shaped samples.
- Test samples with varying proportions to identify the optimal load-to-mass ratio.

- Optimize cross-sections to achieve the best Wy-to-mass ratio.
- Perform flexural tests on formwork samples.

Conclusions

Following this research, we determined that local materials are suitable for permanent formwork production, as their mechanical properties meet the necessary requirements.

For further investigation into strength characteristics, experimental cubes and prisms will be fabricated using concrete that incorporates locally sourced materials, such as

crushed stone, slag, recycled concrete, and brick.

The objective is to design and produce permanent formwork using these materials, aiming to reduce both the cost and labor demands of structural construction while also addressing environmental sustainability.

Additionally, time standards for the installation of permanent formwork made from local materials will be analyzed and compared to those associated with conventional formwork systems.

REFERENCES

1. Kyiv School of Economics. *Zahalna suma priamykh zbytkiv, zavdana infrastrukturi Ukrainy cherez viinu, za pidsumkamy chervnia 2023 roku perevishchyla \$150 mlrd* [Kyiv School of Economics. The total amount of direct surpluses, the destruction of Ukraine's infrastructure through the war, and the sum of the cherub in 2023 exceeded \$150 billion]. 2023. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-pryamih-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-cherez-viynu-za-pidsumkami-chervnya-2023-roku-perevishchyla-150-mlrd/> (in Ukrainian).
2. IMF, World Economic Outlook, April 2024. URL: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2024/04/16/world-economic-outlook-april-2024>
3. Bytko M.M. and Boiko V.V. *Zastosuvannia nezniomnoi opalubky – moda chy ratsionalnyi pidkhid?* [Stacking of small formwork – fashion or rational approach?]. *Naukovi doslidzhennia: Perspektyvy innovatsiinoho rozvytku suspilstva i tekhnologii* [Scientific Research : Prospects for Innovative Development of Marriage and Technology]. Kyiv, 2017, pp. 153–156. (in Ukrainian).
4. Anna Radomska. UNDP supports innovative solution to ‘war waste’ in Ukraine. 2024. URL: <https://www.ungeneva.org/en/news-media/news/2024/06/94321/undp-supports-innovative-solution-war-waste-ukraine>
5. Property Forum Construction waste in Ukraine : What’s the solution? 2023. URL: <https://www.property-forum.eu/news/construction-waste-in-ukraine-whats-the-solution/15592>
6. Koval M.P. *Vyprobuvannia plyty proiznoi chastyny iz zovnishnim armuvanniam avtodorozhnoho zalizobetonnoho mosta* [Testing of the slab of the transverse part from the external reinforcement of a reinforced concrete road bridge]. *Visnik Natsionalnogo universitetu “Lvivska politehnika”* [Bulletin of the National Lviv Polytechnic University]. Lviv : NU “LP” Publ., 2010, no. 662, pp. 245–253. (in Ukrainian).
7. Koval M.P., Fal A.Ye. and Stoianovych S.V. *Nezniomni opalubky dlia zalizobetonnykh plyt proiznoi chastyny mostiv* [Invisible formwork for reinforced concrete slabs of the bridge deck]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy* [Avtoshlyakhovik of Ukraine]. 2012, no. 1, pp. 38–43. (in Ukrainian).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kyiv School of Economics. *Загальна сума прямих збитків, завдана інфраструктурі України через війну, за підсумками червня 2023 року перевищила \$150 млрд.* 2023. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-pryamih-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-cherez-viynu-za-pidsumkami-chervnya-2023-roku-perevishchyla-150-mlrd/>
2. IMF, World Economic Outlook, April 2024. URL: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2024/04/16/world-economic-outlook-april-2024>
3. Битько М. М., Бойко В. В. Застосування незнімної опалубки – мода чи раціональний підхід? *Наукові дослідження : перспективи інноваційного розвитку суспільства і технологій*. Київ, 2017. С. 153–156.
4. Anna Radomska. UNDP supports innovative solution to ‘war waste’ in Ukraine. 2024. URL: <https://www.ungeneva.org/en/news-media/news/2024/06/94321/undp-supports-innovative-solution-war-waste-ukraine>
5. Property Forum Construction waste in Ukraine : What’s the solution? 2023. URL: <https://www.property-forum.eu/news/construction-waste-in-ukraine-whats-the-solution/15592>
6. Коваль М. П. Випробування плити проїзної частини із зовнішнім армуванням автодорожнього залізобетонного моста. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Львів : вид-во НУ “ЛП”, 2010. № 662. С. 245–253.
7. Коваль М. П., Фаль А. Є., Стоянович С. В. Незнімні опалубки для залізобетонних плит проїзної частини мостів. *Автомобільний журнал України*. 2012. № 1. С. 38–43.

Надійшла до редакції: 01.10.2024.

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 ННІ «ПДАБА».

А д р е с а р е д а к ц і ї:

✉ 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 06.01.2025 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 9,44. Умовн. фарб.-відб. арк. 9,44.

Обл.-видавн. арк. 18,88. Наклад 50 прим. Зам. 212

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 ESI "PSACEA".

Editorial address:

✉ room 501 (Executive Secretary)

24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Sent to press on 06 January 2025. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 9,44. Conventional colour imprints 9,44.

Publisher's signatures 18,88. Number of copies 50. Order 212