

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

**УКРАЇНСЬКИЙ
ЖУРНАЛ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (020)
березень – квітень 2024

Дніпро 2024

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

А. С. Беліков, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. М. М. Біляєв, д-р техн. наук, Український державний університет науки і технологій, Дніпро. В. І. Большаков, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. Є. Волкова, д-р техн. наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро. В. М. Волчук, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. С. І. Губенко, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. М. Дерев'яно, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Ю. О. Кірічек, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Т. С. Кравчуновська, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Ю. І. Криворучко, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. О. О. Лапшин, д-р техн. наук, Криворізький національний університет, Кривий Ріг. В. П. Мироненко, д-р арх., Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків. М. М. Налісько, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Т. Д. Нікіфорова, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. І. 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).

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

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

Виходить 6 разів на рік.

Рекомендовано до вченою радою академії, протокол № 9 від 26.03.2024 р.

друку

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

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

ISSN 2710-0367 (Print)

2710-0375 (Online)

Художній і технічний редактор Сергій МОЇСЕСНКО

Перекладач Світлана ЦИГАНКОВА

Редактор та коректор Валентина МАЛОВИК

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

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

**UKRAINIAN JOURNAL
OF CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

№ 2 (020)
March – April 2024

Dnipro 2024

EDITORIAL STAFF :

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

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF :

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

Scientific-Practical Journal is included in	List of scientific professional publications of Ukraine (category "B"), where the results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Engineering Sciences and Architecture (by specialty 132, 191, 192, 194, 263) can be published according to the Resolution of the Ministry of Science and Education of Ukraine No. 157 dated 09.02.2021 (Appendix no. 3).
Certificate of State Registration	of the Print Media – Series KB No. 24586-14526 IIP – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.
Founder & Publisher	State Higher Education Institution "Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Architecture". Issued 6 times a year.
Recommended for publication by	Academic Board of the Academy, no. 9 from 26.03.2024
Journal website	http://uajcea.pgasa.dp.ua
Placement of the scientific-practical journal in the international scientometric databases and e-libraries	Information and analytical systems: InfoBase Index (IBI Factor = 3.96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory Indexing of International Research Journals (CiteFactor). <i>Electronic Libraries and search engines</i> : Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Vernadsky National Library of Ukraine.
ISSN	2710-0367 (Print) 2710-0375 (Online)
	<i>Art & Technical Editor</i> Serhii MOISEIENKO <i>Translator</i> Svitlana TSYHANKOVA <i>Editor & Proofreader</i> Valentyna MALOVYK

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Буцька О. Л., Нікіфорова Т. Д., Буцький Р. В. МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЕГШЕНОГО ПЛОСКОГО ПЕРЕКРИТТЯ З ПУСТОТАМИ ІЗ ПЛАСТИКОВИМИ КУЛЯМИ.....	7
Буцька О. Л., Нікіфорова Т. Д., Шевченко Т. Ю., Буцький Р. В. ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕНОГО ПЛОСКОГО ПЕРЕКРИТТЯ З ПУСТОТАМИ З ПЛАСТИКОВИМИ КУЛЯМИ.....	13
Бейнер Н. В., Бейнер П. С., Кулік М. В., Іваненко Д. С. НЕЙРОМЕРЕЖІ В АРХІТЕКТУРІ: ВІД ІДЕЇ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ.....	18
Бекетов О. В., Лаухін Д. В., Дадіверіна Л. М., Козечко В. І., Тараненко А. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТОВЩИНОЮ ТА СТРУКТУРНИМ СТАНОМ МЕТАЛОПРОКАТУ З НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ.....	26
Гаркуша В. С., Симонов С. І. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЗВЕДЕННЯ ТА РЕМОНТУ ЦИВІЛЬНИХ БУДИНКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ.....	34
Гусєв В. О., Нікіфорова Т. Д. АНАЛІЗ ФАЙЛІВ У ФОРМАТІ STL ЯК ОСНОВА МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	41
Кроль Р. М., Спільник М. А. КОНСТРУКЦІЇ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ КОВШІВ СКРЕПЕРІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ЗАПОВНЕННЯ.....	51
Наумов В. О., Проценко Д. О. ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДЕМОНТАЖУ КОЛОН ЗРУЙНОВАНИХ, ПОШКОДЖЕНИХ І ТИХ, ЩО ВТРАТИЛИ СТІЙКІСТЬ ТА НЕСНУ ЗДАТНІСТЬ У РЕЗУЛЬТАТІ ВИБУХУ.....	57
Прокоф'єва Г. Я., Березюк Г. Г., Ткачова В. В., Солод Л. В., Адегов О. В. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ТРУБЧАСТИМИ ГАЗОВИМИ НАГРІВАЧАМИ У БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗА РОБОТИ В РЕЖИМІ КОНДЕНСАЦІЇ.....	64
Прокоф'єва К. А., Решетілова О. М. ЗМІНИ У ПРАВОВОМУ ПОЛІ КАДРОВОГО ДІЛОВОДСТВА В СУЧАСНИХ УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ.....	72
Русаківа Т. І. АНАЛІЗ РІВНЯ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ.....	82
Слободянюк С. О. РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСАДКИ І ПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ.....	90
Смирнов А. С., Мислицька А. О. ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕРОБЛЕНОГО КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА В ДЕРЕВОГРУНТОБЕТОННІЙ ПЛИТІ.....	99
Харченко К. С., Товстик Т. М., Дьяконов Д. М. ВПЛИВ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПРОЦЕС АРХІТЕКТУРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ.....	106
Яворська О. О., Барабанов С. С. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРИХОВАНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ В КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ЇХ РУЙНУВАННЯ.....	116
Беліков А. С., Дядюшенко О. О., Діброва О. С., Грушовінчук О. В., Хижняк А. А., Ножко І. О. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВОГО ПАЛЬНОГО МАГНІЮ.....	126
Біляєв М. М., Козачина В. В. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ГРУНТОВИХ ВОД ТА ЇХ ЗАБРУДНЕННЯ.....	137
Гусєйнов О. А., Запорожець В. І. СПОСОБИ ВПЛИВУ НА СИСТЕМУ ДЛЯ ЗМІНИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ РЕЧОВИНИ: ДОСВІД, СТАН ПИТАННЯ.....	144
Сєдін В. Л., Ульянов В. Ю., Загільський В. А., Ковба В. В., Горлач С. М., Луговська Є. В. МОЖЛИВІ КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РАДОНОМЕТРІЇ ДОННИХ ОСАДІВ МОРСЬКОГО ШЕЛЬФУ ПРИ ВИШУКАННЯХ НА МАЙДАНЧИКАХ БЕРЕГОВИХ АЕС.....	152

CONTENT

Butska O.L., Nikiforova T.D., Butskiy R.V. MODELING OF A LIGHTWEIGHT FLAT FLOOR WITH VOIDS MADE OF PLASTIC BALLS.....	7
Butska O.L., Nikiforova T.D., Shevchenko T.Yu., Butskiy R.V. SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF A LIGHTWEIGHT FLAT FLOOR WITH VOIDS MADE OF PLASTIC BALLS.....	13
Beiner N.V., Beiner P.S., Kulik M.V., Ivanenko D.S. NEURAL NETWORKS IN ARCHITECTURE: FROM IDEA TO IMPLEMENTATION.....	18
Beketov O.V., Laukhin D.V., Dadiverina L.M., Kozechko V.I., Taranenko A.O. RESEARCH ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE THICKNESS AND THE STRUCTURAL CONDITION OF ROLLED METAL FROM LOW-CARBON LOW-ALLOY STEEL 10G2FB.....	26
Harkusha V.S., Simonov S.I. BASIC PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND REPAIR OF CIVIL BUILDINGS USING BIM-TECHNOLOGIES.....	34
Husiev V.O., Nikiforova T.D. ANALYSIS OF FILES IN STL-FORMAT AS THE BASIS OF MODELING FOR 3D PRINTING OF BUILDING OBJECTS.....	41
Krol R.M., Spilnyk M.A. CONSTRUCTIONS OF TELESCOPIC SCRAPER BUCKETS AND THEIR FILLING TECHNOLOGY.....	51
Naumov V.O., Protsenko D.O. TECHNOLOGIES AND ORGANIZATION OF DISMANTLING COLUMNS DESTROYED, DAMAGED AND THOSE THAT LOST STABILITY AND BEARING CAPACITY AS A RESULT OF THE EXPLOSION.....	57
Prokofieva H.Ya., Bereziuk H.H., Tkachova V.V., Solod L.V., Adehov O.V. MATHEMATICAL MODELING OF THE AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEM WITH TUBULAR GAS HEATERS IN BUILDING STRUCTURES WHEN OPERATING IN THE CONDENSATION MODE.....	64
Prokofieva K.A., Reshetilova O.M. CHANGES IN THE LEGAL FIELD OF PERSONNEL MANAGEMENT IN THE CURRENT CONDITIONS OF MARITAL STATE IN UKRAINE.....	72
Rusakova T.I. ANALYSIS OF THE LEVEL OF OCCUPATIONAL INJURIES.....	82
Slobodianiuk S.O. CALCULATED DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF SHRINKAGE AND TOUCH OF CONCRETE.....	90
Smyrnov A.S., Myslytska A.O. ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING RECYCLED COARSE AGGREGATE IN A WOOD-SOIL CONCRETE SLAB.....	99
Kharchenko K.S., Tovstyk T.M., Diakonov D.M. THE INFLUENCE OF THE DEVELOPMENT OF COMPUTER TECHNOLOGIES ON THE PROCESS OF ARCHITECTURAL DESIGN.....	106
Yavorska O.O., Barabanov S.S. IDENTIFICATION OF HIDDEN DAMAGE IN CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF BUILDINGS AND STRUCTURES TO REDUCE THE RISKS OF THEIR DESTRUCTION.....	116
Bielikov A.S., Diadiushenko O.O., Dibrova O.S., Hrushovinchuk O.V., Khyzhniak A.A., Nozhko I.O. SIMULATION OF THE COMBUSTION PROCESSES OF PYROTECHNIC POWDER OF METAL FUEL MAGNESIUM.....	126
Bilaiev M.M., Kozachyna V.V. MODELING OF GROUND WATER DYNAMICS AND ITS POLLUTION.....	137
Huseinov O.A., Zaporozhets V.I. METHODS OF INFLUENCE ON THE SYSTEM TO CHANGE THE ENERGY STATE OF SUBSTANCE: EXPERIENCE, STATE OF THE ISSUE.....	144
Siedin V.L., Ulianov V.Yu., Zahilskiy V.A., Kovba V.V., Horlach S.M., Luhovska Ye.V. POSSIBLE CONSTRUCTION FEATURES OF EQUIPMENT FOR RADONOMETRY OF BOTTOM SEDIMENTS ON THE SEA SHELF DURING RESEARCH AT SHORE NPP SITES.....	152

УДК 621.643.23:624.012.45.001.13

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.7.1036

МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЕГШЕНОГО ПЛОСКОГО ПЕРЕКРИТТЯ З ПУСТОТАМИ ІЗ ПЛАСТИКОВИМИ КУЛЯМИ

БУЦЬКА О. Л.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
НІКІФОРОВА Т. Д.², докт. техн. наук, проф.,
БУЦЬКИЙ Р. В.³, здобувач

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-00, e-mail: butska.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-00, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

³ ФОП, вул. Ганни Світличної 59л, офіс 18, Павлоград, Україна, e-mail: ruslan.buckiy@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Збірно-монолітне будівництво у вітчизняній та загальносвітовій практиці в останні роки займає значну частку у галузі будівництва. Запропоновано досить велику кількість конструкцій збірно-монолітних полегшених перекриттів, а також окремих конструктивних елементів. Використання полегшених перекриттів у будівництві житлових і громадських будівель дозволяє істотно знизити витрату матеріалів і власну масу конструкцій і збільшити розмір тимчасових навантажень і прогонів, що перекриваються. Незважаючи на це, не можна сказати, що знайдено найефективніші конструктивні рішення, здатні максимально задовольнити вимоги споживачів, архітекторів та будівельників. Виходячи з цього, запропоновано та досліджено досить ефективне з погляду будівництва та подальшої експлуатації конструктивне рішення полегшеного збірно-монолітного перекриття з порожнечами з пластиковими кулями. Конструктивне рішення полегшеного збірно-монолітного плоского перекриття з пустотами з пластиковими кулями має меншу масу, ніж у суцільних перекриттів, та оптимальне використання матеріальних ресурсів, а саме витрат бетону та арматури. Тому дослідження щодо визначення оптимальних параметрів конструкції плоского полегшеного перекриття з пустотоутворювачами з пластиковими кулями актуальне. **Мета статті** – провести числові дослідження напружено-деформованого стану запропонованої конструкції збірно-монолітного перекриття з пустотами з пластиковими кулями. **Висновок.** У результаті досліджень встановлено, що як матеріал для виготовлення пустот з кулями у плоских перекриттях раціонально використовувати порожнисті кулі з переробленої вторсировини. При цьому всі досліджені варіанти перекриттів із прогонами 6, 7, 8 м, та розмірами пустот з кулями діаметрами 180, 315 та 500 мм відповідають вимогам першої та другої груп граничних станів.

Ключові слова: збірно-монолітне будівництво; збірно-монолітне перекриття; плоске полегшене перекриття; пустотоутворювач; перекриття з пустотами; перекриття з пустотоутворювачами

MODELING OF A LIGHTWEIGHT FLAT FLOOR WITH VOIDS MADE OF PLASTIC BALLS

BUTSKA O.L.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NIKIFOROVA T.D.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BUTSKYI R.V.³, *Applicant*

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-00, e-mail: butska.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-00, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

³ Individual Entrepreneur, 591, Anna Svitlichna Str., office 18, Pavlohrad, Ukraine, e-mail: ruslan.buckiy@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. Prefabricated monolithic construction in domestic and global practice in recent years has occupied a small share in the field of construction. A fairly large number of designs of prefabricated monolithic lightweight floors, as well as its individual structural elements, have been proposed. The use of lightweight

floors in the construction of residential and public buildings can significantly reduce the consumption of materials and the dead weight of structures and increase the size of live loads and overlapping spans. Despite this, it cannot be said that effective design solutions have been found that can maximally satisfy the requirements of consumers, architects and builders. Based on this, a constructive solution for a lightweight prefabricated monolithic floor with voids made of plastic balls, quite effective from the point of view of construction and subsequent operation, was proposed and investigated. The proposed design solution for a lightweight prefabricated monolithic flat floor with voids made of plastic balls has less mass than solid floors and optimal use of material resources, namely the consumption of concrete and reinforcement. Therefore, research to determine the optimal design parameters of a flat lightweight floor with void formers made of plastic balls is relevant. **The purpose of the article** is to conduct numerous studies of the stress-strain state of the proposed design of a prefabricated monolithic floor with voids made of plastic balls. **Conclusion.** As a result of the research, it was established that it is rational to use hollow balls made from recycled materials as a material for making voids from balls in flat floors. Moreover, all studied floor options with spans of 6 m, 7 m, 8 m and void sizes made of balls with diameters of 180 mm, 315 mm and 500 mm meet the requirements of the first and second groups of limit states.

Keywords: *prefabricated monolithic construction; prefabricated monolithic floor; flat lightweight floor; void former; floor with voids; floor with void formers*

Постановка проблеми. Найпростішим у зведенні житлових будинків у минулі роки залишалось влаштування монолітного перекриття. Однак це спричинює значне збільшення витрати бетону та обтяження конструкції будівлі. Дуже ефективним для зниження витрати матеріалів, як бетону, так і арматури, та забезпечення рівного перекриття круглої та овальної форми поверхні стало використання перекриття з пустотами.

Збірно-монолітне будівництво в Україні набагато менше розвинене, ніж монолітне або збірне, незважаючи на окремі та досить успішні проекти зведення таких будівель із збірно-монолітного залізобетону в минулому. Проте наразі частка зведених будівель із нових конструктивних рішень збірно-монолітного залізобетону поступово збільшується. Це пов'язано з можливістю в проектних рішеннях одночасного об'єднання позитивних моментів окремо збірного та монолітного видів будівництва в одній збірно-монолітній будівлі [1–3].

Спираючись на успішний досвід будівельників минулих років, а також на досвід зарубіжних спеціалістів, нині в Україні запропоновано різноманіття конструктивних систем зі збірно-монолітного залізобетону, орієнтованих на вимоги сучасного будівництва у плані архітектурних та об'ємно-планувальних рішень.

У процесі дослідження питання зменшення маси монолітної плити й

одночасного забезпечення перекриття рівною поверхнею стель з'явилося конструктивне рішення перекриття з використанням пустот пластикових куль.

Після аналізу наявних конструктивних систем будівель із збірно-монолітного залізобетону і, зокрема, конструкцій перекриттів, що входять до них, автори запропонували і чисельно дослідили конструкцію полегшеного збірно-монолітного перекриття, що виконується з плити-опалубки [2] пустотоутворювачів та монолітного бетону. Конструкція перекриття показана на рисунку 1.

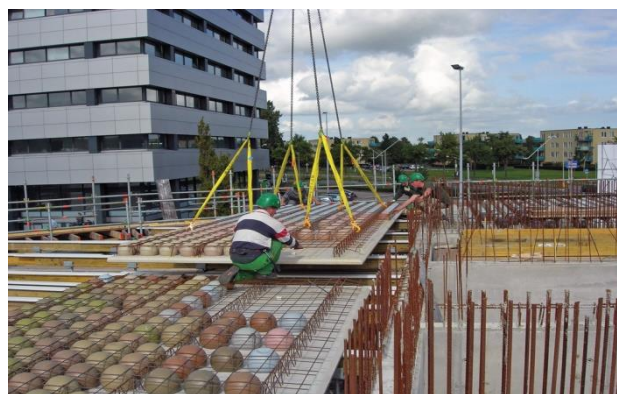


Рис. 1. Плита перекриття з розміщеними всередині порожнистими пластиковими кулями

Перекриття цієї системи складається з армувального каркаса, всередині якого розміщені порожнисті кулі з вторинної сировини – поліетилену та залізобетону, що заповнює весь простір між кульками та шар бетону над ними.

По низу осередку перекриття працюють арматурні стрижні, що сприймають зусилля

розтягу. У місцях перетину перекриття з колоною залишаються суцільні монолітні секції з арматурними каркасами, що забезпечують сприйняття на цих ділянках максимальних зусиль.

Між верхнім та нижнім елементами арматурного каркаса містяться порожнисті пластикові кулі. В результаті полегшується конструкція перекриття, що, у свою чергу, зумовлює зниження маси перекриття на 35 %, ніж еквівалентне перекриття суцільного монолітного бетонного перекриття. Це сприяє значній економії матеріалу на будівлі загалом.

Перевага запропонованого рішення – великі готові до використання технологічні модулі, що виготовляються на заводі. На будівельному майданчику доводять до остаточної форми просторові каркасні клітки із вбудованими в них пластиковими кулями. Арматурні каркаси розташовуються у горизонтальних опалубних формах. Для створення захисного шару бетону зверху каркасів укладаються пластикові підпирні елементи, що забезпечують дотримання точної відстані між поверхнею опалубки прогону та арматурою (рис. 2).



Рис. 2. Фрагмент кріплення на поверхні опалубки арматурних каркасів з порожнистими пластиковими кулями

Мета дослідження – отримання оптимальних параметрів конструктивного рішення перекриття та напружено-деформованого стану плоского збірно-монолітного перекриття з пустотами з пластиковими кулями.

Для досягнення поставленої мети здійснено:

1. вивчення та аналіз існуючих конструктивних рішень плоских збірно-монолітних перекриттів;
2. вибір найбільш раціонального розміру пустотоутворювача;
3. Аналіз умов роботи полегшеного перекриття з різними прогонами та різними діаметрами пустотоутворювачів.

Мета статті – чисельні дослідження напружено-деформованого стану запропонованої конструкції збірно-монолітного перекриття з пустотами з пластиковими кулями.

Результати досліджень. Аналіз поширених в Україні розрахункових програмних комплексів показав, що розрахунок збірно-монолітного перекриття з пустотами з пластиковими кулями можна виконати у будь-якому програмному пакеті, який забезпечує можливість розв'язання статичної задачі, а також у програмних пакетах, в яких можливо, за отриманим напружено-деформованим станом, автоматично підібрати арматуру.

Для числового аналізу напружено-деформованого стану конструкції та оцінення впливу факторів, що впливають на напружено-деформований стан плит збірно-монолітного перекриття, використано програмний комплекс «Ліра» [4].

Для дослідження прийняті монолітні перекриття з довжиною прогону 6, 7 і 8 м, з різними діаметрами пустотоутворювача 180, 315 та 500 мм. Вибір найбільш оптимальних розмірів перекриття залежить від витрат матеріалу на це перекриття за наведеною товщиною бетону для пустотоутворювачів різних діаметрів, при різній проектній товщині плити перекриття.

Конструктивна схема плити перекриття наведена на рисунку 3. При цьому для розглянутої конструктивної схеми перекриття приймалися однакові відстані між пустотоутворювачами і поверхнями плити виходячи з мінімальних конструктивних вимог.

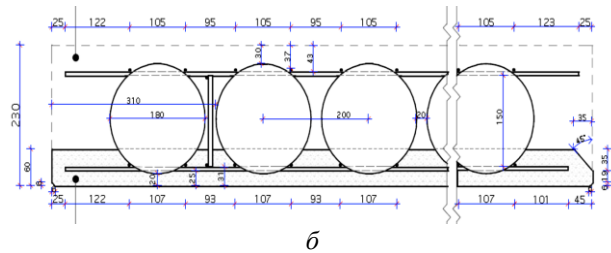
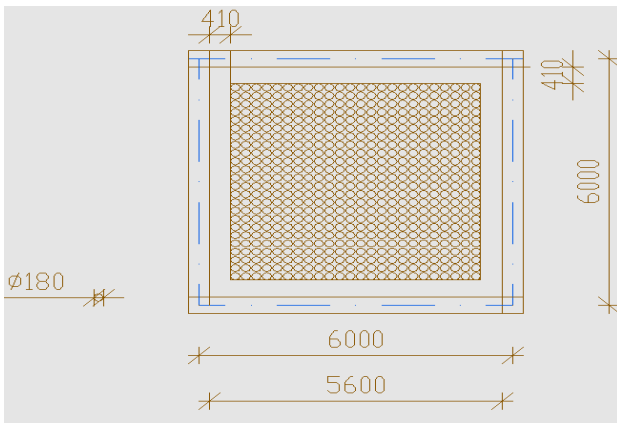


Рис. 3. Конструктивна схема плити перекриття з пустотами з пластиковими кулями:
а – план розташування конструктивних елементів,
б – переріз плити перекриття

Для розрахунку конструкції в ПК «Ліра» має бути створена модель конструкції. Для моделювання плита розбивається на скінченні елементи. Моделювання конструкції показано на прикладі плити з прогоном 6 м і діаметром пустоти 180 мм.

У дослідженні розраховується перекриття кожного варіанта з урахуванням геометричних характеристик та характеристик матеріалу.

Для розглядуваного варіанта основні характеристики перекриття такі: діаметр кулі 180 мм; розмір в осях 6×6 м; висота плити 230 мм; клас бетону: С20/25; класи арматури плити при Ø3...5 мм Вр-1 та при Ø6..25 мм А400с.

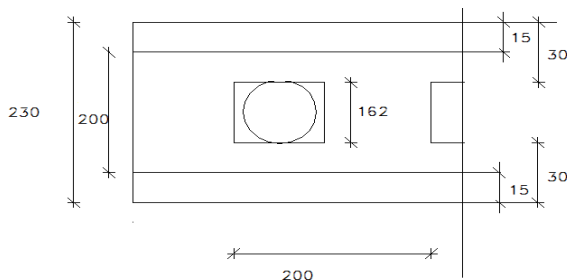


Рис. 4. Зведений переріз перекриття

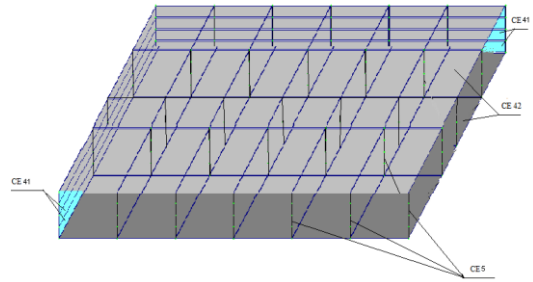


Рис. 5. Розрахункова схема перекриття

Моделюючи розрахункову схему, переріз плити перекриття замінюємо зведеним перерізом (рис. 4).

Розбивку на скінченні елементи здійснюємо в такий спосіб:

- зверху та знизу застосовані плитні скінченні елементи 42;
- умовні балки приймаємо у вигляді балки-стілки СЕ 41;
- перегородки між пустотами прийняті у вигляді стрижнів СЕ 5.

Розрахунок перекриттів прольотом 6, 7, 8 м і діаметрами пустот 180, 315, 500 мм, виконаний за першою та другою групою граничних станів.

Характеристичне значення тимчасового навантаження на перекриття приймалося рівним 1,5 кН/м², як для житлових будівель. Постійне навантаження на перекриття приймалося з урахуванням ваги перегородок. Розмір постійного розрахункового навантаження на перекриття становить – 4,46 кН/м² [5].

Розрахункові навантаження показані на рисунку 6.

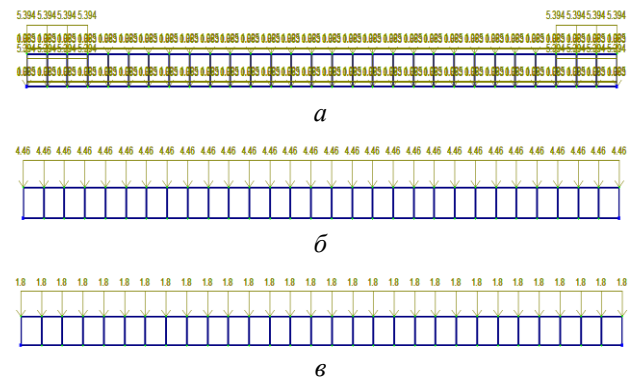


Рис. 6. Розрахункові навантаження на перекриття:
а – власна вага конструкції перекриття;
б – постійне навантаження на перекриття;
в – тимчасове навантаження на перекриття

Результатом статичного розрахунку перекриття з пустотами та умовними балками стали отримані ізополя напруг N_x і N_y у верхній та нижній плиті (відповідно розрахункової моделі рис. 5). Також отримано величини та вид деформації перекриття (рис. 6, табл.).

Таблиця

Максимальні деформації за відповідними напрямками, мм

Ø куль, мм	Прогони 6×6 м			Прогони 7×7 м			Прогони 8×8 м		
	180	315	500	180	315	500	180	315	500
X	0.11	0.18	0.273	0.137	0.103	0.137	0.049	0.073	0.111
Y	0.11	0.18	0.273	0.137	0.103	0.137	0.049	0.073	0.111
Z	2.43	0.55	9.49	2.75	1.88	2.75	0.503	0.909	1.59

У розрахунку приділялась увага напругам в елементах, загальній деформації конструкції та порівнянню її з допустимими величинами напруг у бетони/арматурі та загальній деформації перекриття [6].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону-2003: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип. 59, кн. 1, 2. Київ : Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій Держбуду України, 2003. 264 с.
2. The Original Voided Slab Technology. URL: <https://www.bubbledeck.com/>
3. Мадатян С. А. Новые технологии и материалы для арматурных работ в монолитном железобетоне. *Технологии бетонов*. 2006. № 3. С. 52–54.
4. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Изд. 2-е перераб. и доп. Киев : Сталь, 2002. 600 с.
5. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Київ : Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2009. 97 с.
6. ДСТУ Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України; ДП «Укравхбудінформ», 2012. 312 с.

REFERENCES

1. *Naukovo-tekhnichni problemy suchasnoho zalizobetonu-2003 : Mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk naukovykh prats' (budivnytstvo)* [Scientific and technical problems of the modern reinforced concrete-2003 : Interdepartmental scientific and technical collection of scientific works (building)]. Vol. 59, Book. 1, 2. Kyiv: State scientific and experience institute of building constructions of State building of Ukraine, 2003, 264 p. (in Ukrainian).
2. The Original Voided Slab Technology. URL: <https://www.bubbledeck.com/>

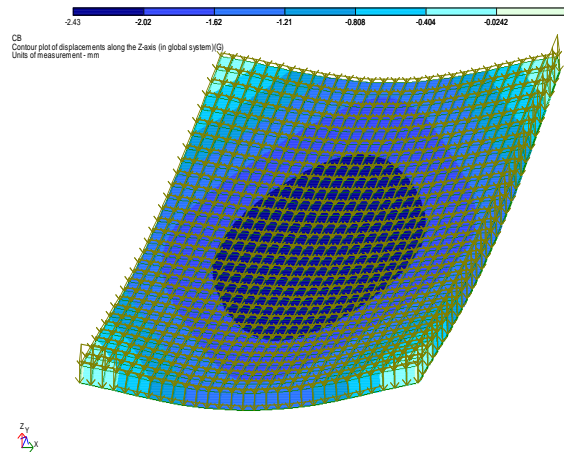


Рис. 7. Деформована схема перекриття

За заданої конструктивної схеми та даних навантажень всі варіанти плит перекриттів відповідають умовам обох груп граничних станів.

Висновки

1. За аналізом існуючих програмних комплексів для моделювання полегшеного збірно-монолітного перекриття з пустотами з пластиковими кулями обрано програмний комплекс «Ліра».
2. Виконано модель перекриття, що відповідає реальній роботі конструкції.
3. За заданої конструктивної схеми та даних навантажень всі варіанти плит перекриттів відповідають умовам обох груп граничних станів.

3. Madatyan S.A. *Novyye tekhnologii i materialy dlya armaturnykh rabot v monolitnom zhelezobetone* [New technologies and materials for reinforcement works in monolithic reinforced concrete]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2006, no. 3, pp. 52–54. (in Russian).
4. Perelmuter A.V. and Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza* [Calculation models of structures and the possibility of their analysis]. Ed. 2nd rev. and add. Kyiv : Steel Publ., 2002, 600 p. (in Russian).
5. *DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya i vplyvy* [SBN B.1.2-2:2006. Loading and influences]. Kyiv : Ministry of building, architecture and housing and communal services of Ukraine, 2009, 97 p. (in Ukrainian).
6. *DSTU B EN 1992-1-1:2010. Yevrokod 2: Proektuvannya zalizobetonnykh konstruksiy. Chastyna 1-1. Zahal'ni pravyla i pravyla dlya sporud* [SSTU B EN 1992-1-1:2010. Eurokod 2: Planning of reinforce-concrete constructions. Part 1-1. General rules and rules for building]. Kyiv : Ministry of regional development and building of Ukraine; SE “Ukrarhbudinfor”, 2012, 312 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 22.02.2024.

УДК 621.643.23:624.012.45.001.13

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.13.1037

ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕНОГО ПЛОСКОГО ПЕРЕКРИТТЯ З ПУСТОТАМИ З ПЛАСТИКОВИМИ КУЛЯМИ

БУЦЬКА О. Л.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
НІКІФОРОВА Т. Д.², докт. техн. наук, проф.,
ШЕВЧЕНКО Т. Ю.³ канд. техн. наук, доц.,
БУЦЬКИЙ Р. В.⁴, здобувач

^{1*}Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-00, e-mail: butska.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

²Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-00, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

³Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-00, e-mail: shvchenko.tetyana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0055-9819

⁴ФОП, вул. Ганни Світличної 59л, офіс 18, Павлоград, Україна, e-mail: ruslan.buckiy@gmail.com

Анотація. *Постановка проблеми.* Архітектурно-будівельне проектування будівель із застосуванням залізобетону зумовило зростання числа об'єктів з індивідуальною об'ємно-планувальною структурою, багатою різноманітністю фасадних та об'ємних рішень. Сьогодні актуальним стало питання про ефективність застосування плоского збірно-монолітного полегшеного перекриття у зведенні багатопверхових будівель з індивідуальними об'ємно-планувальними та архітектурними рішеннями. В умовах ринкової економіки різко зріс інтерес до питання раціонального використання ресурсів, а саме витрат бетону та арматури в будівництві, що безпосередньо пов'язане із залученням інвестицій. Як відомо, під час проектування будівель зі збірно-монолітного залізобетону, на відміну від збірного, з'являється велика свобода в прийнятті об'ємно-планувальних параметрів будівлі, а також можуть існувати більш прості конструктивні рішення, зокрема, перекриттів. Конструктивне рішення перекриттів залежить від численних вимог, що висуваються в цілому до будівлі і безпосередньо до перекриття. Одна з вимог, що впливають на залученість інвестицій, – мала матеріалоемність перекриття при значних прогонах будівель різних конструктивних систем. Ефективне застосування полегшеного перекриття зі збірно-монолітного залізобетону з пустотами з пластиковими кулями у будівництві потребує всебічного техніко-економічного аналізу інноваційного рішення конструкції перекриття зі збірно-монолітного залізобетону. *Мета статті* – виконати техніко-економічне порівняння різних варіантів конструктивних рішень плоского полегшеного збірно-монолітного перекриття. Розглянуто вплив параметрів перекриття на витрату бетону та арматури. *Висновок.* Установлено, що як матеріал для виготовлення пустот із кулями у плоских перекриттях раціонально використовувати порожнисті кулі з переробленої вторсировини. При цьому всі досліджені варіанти перекриттів із прольотами 6, 7, 8 м та розмірами пустот із куль діаметрами 180, 315 та 500 мм відповідають вимогам першої та другої групи граничних станів.

Ключові слова: збірно-монолітне будівництво; збірно-монолітне перекриття; плоске полегшене перекриття; пустотоутворювач; перекриття з пустотами; перекриття з пустотоутворювачами

SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF A LIGHTWEIGHT FLAT FLOOR WITH VOIDS MADE OF PLASTIC BALLS

BUTSKA O.L.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NIKIFOROVA T.D.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BUTSKYI R.V.³, *Applicant*

¹ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-00, e-mail: butska.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-00, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

³ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture,

24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-00, e-mail: shevchenko.tetyana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0055-9819

⁴ Individual Entrepreneur, 591, Anna Svitlichna Str., office 18, Pavlohrad, Ukraine, e-mail: ruslan.buckiy@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. Architectural and construction design of buildings using reinforced concrete has led to an increase in the number of objects with an individual space-planning structure, a rich variety of facade and volumetric solutions. Today the question of the effectiveness of using flat prefabricated monolithic lightweight floors in the construction of multi-storey buildings with individual space-planning and architectural solutions is relevant. In a market economy interest in the issue of rational use of resources, namely the cost of concrete and reinforcement in construction, has sharply increased, which is directly related to attracting investment. As it is known, when designing buildings from prefabricated monolithic reinforced concrete, in contrast to prefabricated concrete, there is greater freedom in adopting the space-planning parameters of the building, and there may also be simpler design solutions, in particular for floors. The constructive solution of floors depends on numerous requirements for the building as a whole and directly for the floor. One of the requirements that influences the attraction of investments is a small material-intensive floor covering with significant spans of buildings of various structural systems. The effective use of lightweight precast monolithic reinforced concrete floors with voids made of plastic balls in construction requires a comprehensive technical and economic analysis of this innovative solution for the precast monolithic reinforced concrete floor structure. **The purpose of the article** is to perform a technical and economic comparison of various design options for a flat lightweight prefabricated monolithic floor. The influence of floor parameters on the consumption of concrete and reinforcement is considered. **Conclusion.** As a result of the research, it was established that it is rational to use hollow balls made from recycled materials as a material for making voids from balls in flat floors. Moreover, all studied floor options with spans of 6 m, 7 m, 8 m and void sizes made of balls with diameters of 180 mm, 315 mm and 50 mm meet the requirements of the first and second groups of limit states.

Keywords: *prefabricated monolithic construction; prefabricated monolithic floor; flat lightweight floor; void former; floor with voids; floor with void formers*

Постановка проблеми. У сучасному будівництві багатоповерхових споруд вартість перекриттів досягає 30 % вартості загальнобудівельних робіт і на перекриття припадає до 60 % загальних витрат залізобетону. Показники матеріаломісткості перекриттів впливають на економічність усіх конструкцій будівлі, а саме стін, колон, фундаментів і, в цілому, на об'ємно-планувальні рішення будівель [1].

Питома вага новобудов із монолітного залізобетону в низці великих міст зросла до 25–30 %. При цьому перекриття часто виконують із безбалковими плитами, які мають максимальну матеріаломісткість. Це зумовлено тим, що сьогодні обсяг застосування нових конструктивних рішень перекриттів із монолітного або збірно-монолітного бетону з використанням пустотоутворювачів досить малий, що викликає збільшення витрати сталі до 50 % порівняно з поширеними збірними попередньо напруженими конструкціями перекриттів.

Якщо, вартість перекриття становить 30 % від загальної вартості будівлі, необхідно приділяти увагу розробленню та використанню більш економічних

конструктивних рішень перекриттів. Одним із способів зниження ваги конструкції перекриття бачиться влаштування пустот у перекритті, при цьому зменшується не тільки витрата бетону, а й загальна маса перекриття, що сприяє зменшенню загального навантаження і, як наслідок, зниженню витрат арматури на армування перекриття в цілому.

У цьому дослідженні розглядається збірно-монолітне залізобетонне перекриття з пустотами із пластиковими кулями, за допомогою яких можна значно знизити витрати бетону, але при цьому будівля задовольнятиме вимоги щодо надійності та довговічності.

Також у даному перекритті прийнято рішення виконання умовних балок, для будівництва яких не треба використовувати додаткову опалубку, завдяки чому зменшиться термін будівництва та знизиться трудомісткість. Проблема раціонального використання будівельної сировини та здешевлення будівництва в нашій країні дуже важлива та актуальна.

Запропоноване плоске збірно-монолітне перекриття являє собою плиту опалубку, розташовану понизу плити перекриття,

поверх якої вкладаються пустотоутворювачі у вигляді куль (рис. 1), а потім виконується загальне замонолічення всієї конструкції перекриття [2].

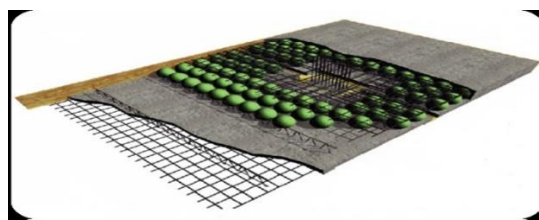


Рис. 1. Плита перекриття з розміщеними всередині порожнистими пластиковими кулями

Пустоти в даному перекритті виготовляються шляхом укладання в бетон поліпропіленових порожнистих куль високої щільності, що розташовуються згідно з проектом і розміщуються між армувальними сітками. Матеріал пустотоутворювачів не вступає в хімічну реакцію з бетоном або арматурою, не має пористості, достатньо жорсткий і міцний, щоб сприймати навантаження, такі як заливка бетонної суміші (рис. 2).



Рис. 2. Бетонування перекриття з пустотоутворювачами з пластикових куль

Полегшене збірно-монолітне перекриття з пустотами з пластиковими кулями має такі переваги [3]:

- менша вага перекриття, порівняно із суцільними плитами, завдяки чому зменшується кількість або розмір несних конструкцій будівлі та фундаментів;
- зниження навантаження на несні конструкції полегшеного перекриття;
- менші витрати матеріалів на перекриття;
- збільшення жорсткості плити, порівняно зі збірним перекриттям;
- збільшена висота перерізу при менших витратах матеріалу, що підвищує жорсткість полегшених перекриттів;

– зниження транспортувальних витрат конструкції перекриття порівняно зі збірними.

– поліпшена звукоізоляція у закритих стельових порожнинах.

Мета статті – вибір раціональних параметрів збірно-монолітних плоских перекриттів із пустотами з пластиковими кулями при заданих характеристиках бетону та арматури. Розглянуто вплив параметрів перекриття на витрату бетону та арматури.

Результати досліджень. Для числового аналізу напружено-деформованого стану конструкції збірно-монолітного перекриття з пустотами з пластиковими кулями та оцінення витрат бетону та арматури на перекриття створено розрахункову модель перекриття з пустотами [4], що оперті за контуром на умовні балки, для розрахунку в програмному комплексі «Ліра» (див. статтю в цьому збірнику). У цьому комплексі виконано розрахунок створеної моделі перекриття за першою та другою групою граничних станів.

Отримано поздовжні та поперечні напруги N_x та N_y у конструкції перекриття.

За отриманими результатами напруги виконано підбір арматури для плит перекриття з довжиною прольоту 6, 7 і 8 м, з різними діаметрами пустотоутворювача 180, 315 та 500 мм під корисне характеристичне навантаження 1,5 кПа.

Конструктивна схема плити перекриття з прогонами 6×6 м та пустотоутворювачами діаметром 180 мм наведена на рисунку 3. При цьому для розглянутої конструктивної схеми перекриття приймалися однакові відстані між пустотоутворювачами і поверхнями плити виходячи з мінімальних конструктивних вимог.

Розрахунок армування в перекритті виконаний з умови сприйняття арматурою всіх напруг розтягу, опорними і прогоновими поперечними перерізами балок і поперечним перерізом плити перекриття. Потім за підібраними діаметрами арматури виконано розкладку сіток у перекритті (рис. 4).

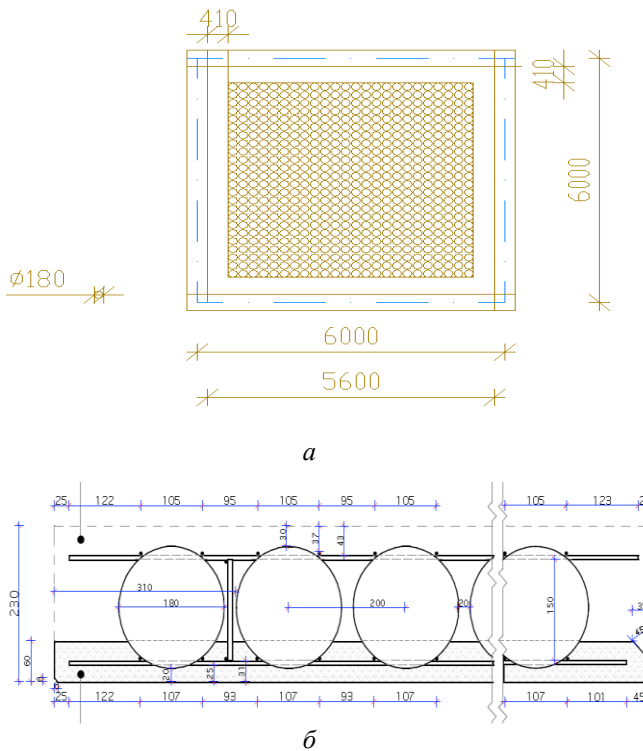


Рис. 3. Конструктивна схема плити перекриття з пустотами з пластиковими кулями:
а – план розташування конструктивних елементів,
б – переріз плити перекриття

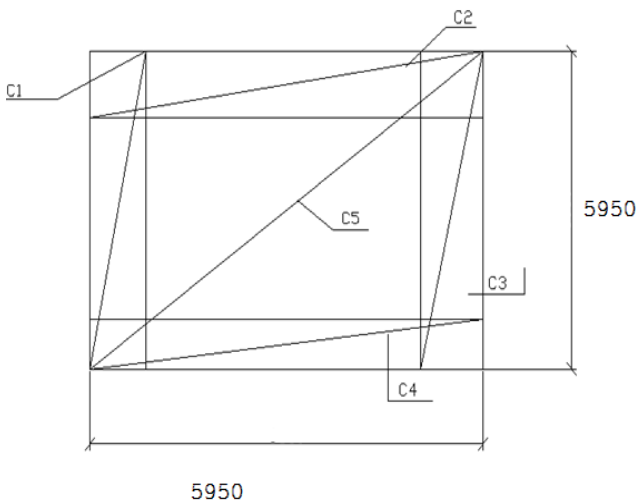


Рис. 4. Схема розташування сіток плити перекриття

У розрахункових фрагментах монолітного перекриття з пустотами зміна як довжини прогону конструкції, так і величини пустотоутворювача, а саме і товщини конструкції відіграє значну роль:

1) значно збільшуються витрати бетону при збільшенні пустотоутворювача та зменшуються при збільшенні величини прогону конструкції (табл. 1).

Таблиця 1

Витрати бетону на перекриття, м³/м²

Варіанти перекриття	Витрати бетону, м ³ /м ²
Варіант 1 (Ø180 mm, l = 6 m)	0,182
Варіант 2 (Ø 180 mm, l = 7 m)	0,171
Варіант 3 (Ø 180 mm, l = 8 m)	0,169
Варіант 4 (Ø 315 mm, l = 6 m)	0,246
Варіант 5 (Ø 315 mm, l = 7 m)	0,238
Варіант 6 (Ø 315 mm, l = 8 m)	0,246
Варіант 7 (Ø 500 mm, l = 6 m)	0,454
Варіант 8 (Ø 500 mm, l = 7 m)	0,439
Варіант 9 (Ø 500 mm, l = 8 m)	0,428

2) Втрати арматури збільшуються при збільшенні величини прогону та зменшуються при збільшенні пустотоутворювача конструкції (табл. 2).

Таблиця 2

Витрати арматури на перекриття, м³/м²

Варіанти перекриття	Витрати арматури, кг/м ²
Варіант 1 (Ø180 mm, l = 6 m)	17,55
Варіант 2 (Ø 180 mm, l = 7 m)	13,98
Варіант 3 (Ø 180 mm, l = 8 m)	14,92
Варіант 4 (Ø 315 mm, l = 6 m)	14,2
Варіант 5 (Ø 315 mm, l = 7 m)	14,36
Варіант 6 (Ø 315 mm, l = 8 m)	16,2
Варіант 7 (Ø 500 mm, l = 6 m)	4,88
Варіант 8 (Ø 500 mm, l = 7 m)	3,86
Варіант 9 (Ø 500 mm, l = 8 m)	4,17

3) Вартість матеріалів на улаштування 1 м² перекриття збільшуються при збільшенні величини прольоту та при збільшенні Ø пустотоутворювача конструкції (табл. 3).

Таблиця 3

Вартість матеріалів на улаштування 1 м² перекриття, грн

Віранти перекриття	Вартість 1 м ² , грн
Варіант 1 (Ø180 mm, l = 6 m)	936,0
Варіант 2 (Ø 180 mm, l = 7 m)	804,15
Варіант 3 (Ø 180 mm, l = 8 m)	827,9
Варіант 4 (Ø 315 mm, l = 6 m)	979,5
Варіант 5 (Ø 315 mm, l = 7 m)	966,3
Варіант 6 (Ø 315 mm, l = 8 m)	1113,3
Варіант 7 (Ø 500 mm, l = 6 m)	1167,9
Варіант 8 (Ø 500 mm, l = 7 m)	1081,05
Варіант 9 (Ø 500 mm, l = 8 m)	1088,1

Для визначення раціональних параметрів конструкції враховується як витрата матеріалів, так і їх вартість. За поточними розцінками на січень 2024 року середня вартість 1 м³ бетону класу С20/25 становить – 2 250 грн; середня вартість 1 т арматури складає 30 000 грн. Згідно з вартістю матеріалів на улаштування 1 м² перекриття найбільш оптимальним є перекриття з прогонами 7×7 м та пустотоутворювачем Ø 180 мм.

Висновки

1. У розрахунках перекриття щодо витрати арматури значну роль відіграє зміна Ø пустотоутворювача, тобто товщини плити при постійному прогоні конструкції. При збільшенні Ø від 180 до 500 мм спостерігається зменшення витрат арматури.
2. У розрахунках перекриття щодо витрати арматури важливу роль відіграє

зміна прогону конструкції при постійній товщині конструкції (Ø пустотоутворювача). При збільшенні прогону конструкції з 6 до 8 м витрата арматури збільшується.

3. Для виявлення оптимальних параметрів конструкції збірно-монолітного перекриття з пустотами з пластиковими кулями враховується не лише витрата, а й вартість матеріалів.

При збільшенні товщини плити (Ø пустотоутворювача) чи збільшенні прогону конструкції з 6 до 8 м спостерігається збільшення вартості 1 м² збірно-монолітного перекриття.

4. Згідно з вартістю матеріалів на улаштування 1 м² перекриття найбільш оптимальним є перекриття з прогонами 7×7 м та пустотоутворювачем Ø 180 мм.

СПИСОК ВИКОРИСАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону-2003: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип. 59, кн. 1, 2. Київ : Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій Держбуду України, 2003. 264 с.
2. The Original Voided Slab Technology. URL: <https://www.bubbledeck.com/>
3. Мадатян С. А. Новые технологии и материалы для арматурных работ в монолитном железобетоне. *Технологии бетонов*. 2006. № 3. С. 52–54.
4. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Изд. 2-е перераб. и доп. Киев : Сталь, 2002. 600 с.
5. Степанов И. С. Экономика строительства : учеб. для вузов. Юрайт, 2002.

REFERENCES

1. *Naukovo-tekhnichni problemy suchasnoho zalizobetonu-2003 : Mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk naukovykh prats' (budivnytstvo)* [Scientific and technical problems of the modern reinforced concrete-2003 : Interdepartmental scientific and technical collection of scientific works (building)]. Vol. 59, Book. 1, 2. Kyiv: State scientific and experience institute of building constructions of State building of Ukraine, 2003, 264 p. (in Ukrainian).
2. The Original Voided Slab Technology. URL: <https://www.bubbledeck.com/>
3. Madatyán S.A. *Novyye tekhnologii i materialy dlya armaturnykh rabot v monolitnom zhelezobetone* [New technologies and materials for reinforcement works in monolithic reinforced concrete]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2006, no. 3, pp. 52–54. (in Russian).
4. Perelmuter A.V. and Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza* [Calculation models of structures and the possibility of their analysis]. Ed. 2nd rev. and add. Kyiv : Steel Publ., 2002, 600 p. (in Russian).
5. Stepanov I.S. *Ekonomika stroitelstva* [Economics of construction : textbook for universities]. Yurayt Publ., 2002. (in Russian).

Надійшла до редакції: 03.03.2024.

УДК 004.93:72

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.18.1038

НЕЙРОМЕРЕЖІ В АРХІТЕКТУРІ : ВІД ІДЕЇ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ

БЕЙНЕР Н. В.¹, канд. техн. наук,
БЕЙНЕР П. С.^{2*}, канд. техн. наук,
КУЛІК М. В.³, канд. техн. наук,
ІВАНЕНКО Д. С.⁴, асп.

¹ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел.: +38 (050) 670-68-07, e-mail: beynern@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6695-577X

^{2*} Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел.: +38 (066) 471-40-00, e-mail: beyner@icloud.com, ORCID ID: 0000-0002-3488-767X

³ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел.: +38 (099) 088-22-83, e-mail: starwarskmv4@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4880-5217

⁴ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел.: +38 (068) 528-67-86, e-mail: d.sergeevich108@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1635-1214

Анотація. Постановка проблеми. В сучасному процесі проектування дедалі більше використовуються передові технології, що дозволяють створювати складні та інноваційні будівельні проекти. Нейромережі відіграють важливу роль у розвитку автоматизованих методів генерації зображень в архітектурній сфері, враховуючи різноманітні стилі, форми та текстури. Однак, незважаючи на швидкий розвиток цих технологій, існують серйозні проблеми, які гальмують їх повноцінне впровадження в архітектурну практику. Генерація красивих картинок-концепцій за допомогою нейромереж залишається далекою від реалізації. Ці зображення можуть бути інспіраційними, але не вирішують технічних аспектів, таких як розроблення 3D-моделей, підготовка креслень та виконання розрахунків, які необхідні для успішного втілення проекту в життя. Необхідно забезпечити баланс між естетикою та функціональністю, що є ключовим моментом для успішної реалізації будівельних проектів. **Мета статті** – розглянути проблематику, пов'язану з генерацією картинок-концепцій у сфері архітектури з використанням MidJourney та інших аналогічних платформ. Основний фокус – це аналіз того, чому генерація картинок-концепцій стала лише першим кроком в архітектурному проектуванні. Потрібні додаткові етапи, такі як розробка 3D-моделей, підготовка креслень і виконання розрахунків. Це дозволить перетворити ідеї, представлені на картинках, на конкретні тривимірні об'єкти, враховуючи технічні аспекти та інженерні системи.

Ключові слова: нейромережі; MidJourney; архітектурне проектування; 3D-моделювання; штучний інтелект

NEURAL NETWORKS IN ARCHITECTURE: FROM IDEA TO IMPLEMENTATION

BEINER N.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
BEINER P.S.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.)*,
KULIK M.V.³, *Cand. Sc. (Tech.)*,
IVANENKO D.S.⁴, *Postgraduate Student*

¹ Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (050) 670-68-07, e-mail: beynern@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6695-577X

^{2*} Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (066) 471-40-00, e-mail: beyner@icloud.com, ORCID ID: 0000-0002-3488-767X

³ Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (099) 088-22-83, e-mail: starwarskmv4@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4880-5217

⁴ Department of Construction Production and Project Management, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskiy Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (068) 528-67-86, e-mail: d.sergeevich108@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1635-1214

Abstract. Problem Statement. In the modern design process, advanced technologies are increasingly being utilized to create complex and innovative architectural projects. Neural networks play a crucial role in the development of automated image generation methods in the architectural field, considering various styles, forms, and textures. However, despite the rapid advancement of these technologies, there are significant issues hindering their full integration into architectural practice. Generating beautiful concept images using neural networks remains far from realization. These images may be inspirational but do not address technical aspects such as developing 3D models, preparing drawings, and performing calculations necessary for the successful implementation of projects. Striking a balance between aesthetics and functionality is a key factor for the successful realization of construction projects. **The aim of the article** is to examine the issues related to image concept generation in architecture using MidJourney and similar platforms. The primary focus is on analyzing why generating concept images is only the initial step in architectural design. Additional stages are required, such as developing 3D models, preparing drawings, and performing calculations. This will transform the ideas presented in images into tangible three-dimensional objects, considering technical aspects and engineering systems.

Keywords: neural networks; MidJourney; architectural design; 3D-modeling; artificial intelligence

Постановка проблеми. У сучасній архітектурній практиці з'явилися інноваційні технології, що дозволяють генерувати красиві картини-концепції за допомогою нейромереж. Платформи, такі як MidJourney, DALL-E, NightCafe надають можливість швидко створювати вражаючі візуалізації будівельних проектів, що допомагає архітекторам та клієнтам отримати уявлення про вигляд майбутніх споруд.

Проте, незважаючи на естетичну привабливість та інспіраційну цінність згенерованих зображень, виникає проблема з їх фактичною придатністю для використання в архітектурному проектуванні. Генерація концепцій за допомогою нейромереж залишається далекою від реалізації, оскільки ці зображення не вирішують технічних аспектів, критичних для успішного будівництва.

Генерація картинок-концепцій – це лише перший етап в архітектурному процесі. По завершенні цього етапу необхідно переходити до більш конкретних технічних завдань, таких як розроблення 3D-моделей, підготовка креслень та виконання розрахунків.

Відсутність технічної інформації постає суттєвим недоліком. Згенеровані картини не містять достатньої технічної інформації, необхідної для вирішення інженерних аспектів проекту, таких як конструкція, електрика, вентиляція та інші.

Такі картини-концепції можуть бути корисними для загального уявлення про

проект, але для прийняття рішень та роботи над деталями потрібні більш обґрунтовані технічні дані та аналіз. Отже, важливо зберігати баланс між естетичністю та технічною реалізованістю проекту.

Мета роботи – визначити необхідні додаткові етапи у процесі архітектурного проектування за допомогою нейромереж, такі як розробка 3D-моделей, підготовка креслень та виконання розрахунків, які відіграють ключову роль у конкретизації та успішній реалізації будівельних проектів.

Основна частина. Сучасна архітектура постійно розвивається, прагнучи поєднати естетику, функціональність та інноваційний підхід. Розглянемо роль нейромереж в архітектурі, зокрема, використання методів генерації концепцій, які надають можливість отримувати унікальні концептуальні форми та ідеї, які можна реалізувати на практиці. Для аналізу та дослідження цих аспектів використовували MidJourney, потужний інструмент, який надає можливості для швидкої та ефективного генерації вражаючих візуалізацій (рис. 1).

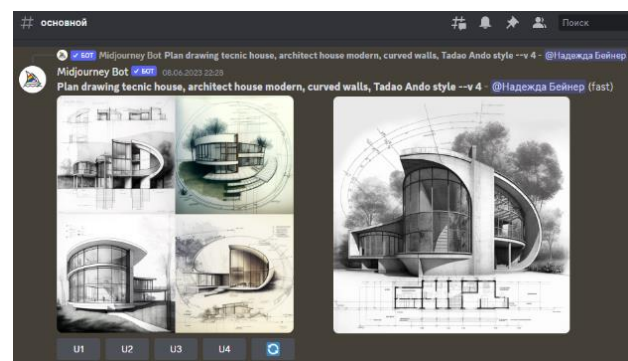


Рис. 1. Процес генерації архітектурних концепцій за допомогою нейромереж

У рамках дослідження виконувався пошук органічних форм. Проводилось уточнення геометрії окремих архітектурних елементів.

Використання нейромереж для генерації концепцій дозволяє створювати будинки та споруди, які важко було б уявити наочно [1]. Вони можуть бути надзвичайно складними та органічними, або, навпаки, мінімалістичними та функціональними [2]. Прикладом може бути створення футуристичних конструкцій або архітектурних елементів, які ідеально вписуються в природні ландшафти (рис. 2).

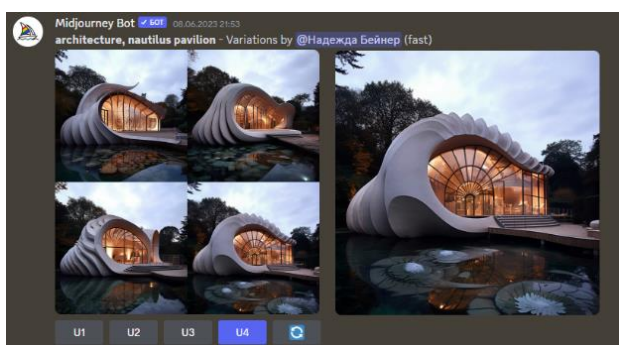


Рис. 2. Інноваційні концепції проектування за допомогою MidJourney

Найважливіша перевага використання нейромереж у проектуванні – можливість реалізувати згенеровані ідеї в реальному житті. Це відкриває перспективи для створення архітектурних шедеврів, які вражають своєю оригінальністю та естетикою.

Цей процес ґрунтується на використанні складних моделей штучного інтелекту [3]. Багато зображень опрацьовується в контексті використання глибокого навчання для архітектурного моделювання. Ці зображення можуть включати фотографії різних споруд, будівель, пейзажів і дизайнерських концепцій. Крім того, до опрацьованого набору даних можуть входити різноманітні типи архітектурних елементів, такі як фасади будівель, внутрішні приміщення, плани поверхів, розміщення меблів та інше. Це дозволяє нейромережі створювати більш точні та реалістичні візуалізації будівельних проектів на основі вхідних даних [4].

Використання нейромережі MidJourney дозволяє забезпечити індивідуалізацію архітектурних проектів. Жоден об'єкт не буде порушувати авторські права (рис. 3).



Рис. 3. Результат пошуку органічних форм у нейромережі

Ця нейромережа базується на великому обсязі даних та алгоритмів глибокого навчання, що дозволяє їй створювати унікальні концепції, враховуючи специфіку місця та функціональні потреби об'єкта [2].

MidJourney аналізує та опрацьовує набори архітектурних параметрів, такі як розміри, форма, матеріали та функціональність, і генерує різноманітні концепції, які відповідають унікальним вимогам кожного проекту [4].

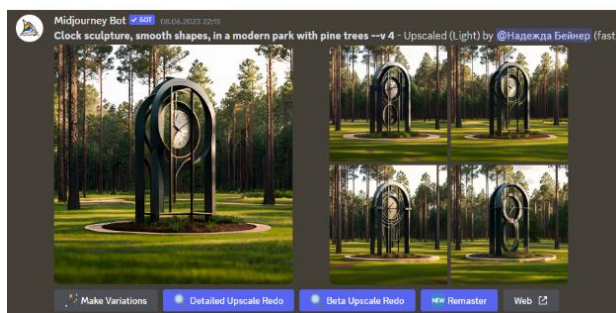


Рис. 4. Приклад використання нейромережі MidJourney

Врахування особливостей місцевості надає можливість відображати ідентичність та культурний дух кожного конкретного місця. MidJourney може адаптувати архітектурні концепції до природних пейзажів, місцевих кліматичних умов, культурних особливостей та історичного контексту. Наприклад, для генерації

скульптури годинника для ландшафтно-рекреаційної зони було вказано параметр оточення «сосновий ліс» (рис. 4).

Кожен результат має незначні відмінності. Картинку, що згенерована, можна уточнювати та корегувати для отримання більш оптимального результату.

Нейромережа враховувала це в своїх алгоритмах та створила скульптуру, яка гармонійно доповнює простір (рис. 5).



Рис. 5. Приклад урахування особливостей місцевості при генерації скульптури годинника

Використання нейромереж в архітектурному проектуванні дозволяє досягти більшої творчості, ефективності та неповторності [5]. Застосування MidJourney дає такі переваги:

1. Можна створювати концепції та форми, які можуть бути абсолютно унікальними. Вони допомагають розробникам розглядати нові архітектурні ідеї та підходи, що раніше були недоступні.

2. Використання нейромереж для генерації концепцій може зменшити час, потрібний для розроблення проекту, оскільки алгоритми можуть працювати над кількома варіантами одночасно. Це сприяє підвищенню продуктивності [6].

3. Є можливість адаптувати архітектурні рішення до конкретного середовища або контексту, такого як локація будівництва, кліматичні умови, енергоефективність тощо.

4. Нейромережі можуть бути налаштовані на генерацію архітектурних форм з високою екологічною сумісністю,

допомагаючи зменшити негативний вплив будівництва на навколишнє середовище.

5. Архітектурні концепції, створені за допомогою нейромереж, можуть бути легко модифіковані й адаптовані в процесі розроблення проекту [7].

6. Використання нейромереж може поліпшити робочий процес архітекторів та дозволити їм концентруватися на творчості та інноваціях [5].

Таким чином, створення архітектурних форм за допомогою нейромереж, які не обмежені традиційними підходами, відкриває можливість для архітекторів експериментувати із структурою, функціональністю та естетикою. Такий підхід сприяє появі неповторних та інноваційних архітектурних рішень, які привертають увагу та стають символами креативності. Головною перевагою стала здатність генерації унікальних та естетичних архітектурних концепцій, які важко було б моделювати іншими засобами.

За допомогою нейромережі MidJourney сформовано такі архітектурно-композиційні рішення:

1. Літній кінотеатр – архітектурний об'єкт, розрахований на проведення кінопоказів просто неба. Його концепція має органічні форми.

2. Фонтан «Хвиля часу» – унікальний фонтан, який має символічне значення та створює враження руху часу.

3. Виставковий павільйон – архітектурна споруда, призначена для проведення виставок і подій. Його форма та структура представлена у вигляді сучасної інноваційної споруди з використанням скляних панелей та металевих конструкцій, що створює враження легкості та прозорості.

Розглянемо процес створення літнього кінотеатру. На початковому етапі застосовувалася нейромережа MidJourney, яка запропонувала чотири різні варіанти для пошуку оптимальної форми структури. Кожен із цих варіантів враховував естетичні та функціональні аспекти кінотеатру, які були отримані за рахунок запиту по чіткому алгоритму. Були задані критерії, які

включають органічну архітектуру та оточення (рис. 6).

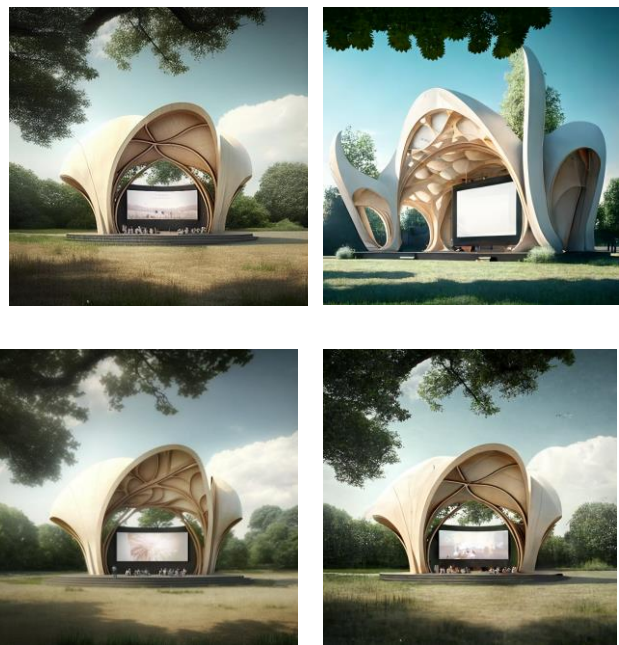


Рис. 6. Генерація концепцій літнього кінотеатру

Забезпечуючи комфорт та естетичність у просторі відкритого неба, концепція літнього кінотеатру враховувала такі важливі аспекти як зонування простору для оптимального розміщення глядачів та забезпечення зручності перебування. Крім того, споруда була адаптована до погодних умов, забезпечуючи захист від сонця, вітру та дощу, щоб глядачі могли насолоджуватися кінопоказами в будь-яку погоду.

Згенеровані зображення та концепції були оцінені і найбільш оптимальні рішення обрані для подальшого розвитку. Після цього була створена точна 3D-модель кінотеатру, яка являла собою комбінацію фрагментів з отриманих зображень. Для цього використано високодеталізовану сітку моделі, що дозволила точно відтворити органічні форми споруд; а також спеціалізоване програмне забезпечення для скульптингу ZBrush.

На цьому етапі моделювання були внесені корективи, щоб забезпечити відповідність кожного елемента його оригінальному вигляду та пропорціям. Комп'ютерний скульптинг складної форми вимагає креативного бачення. Після

комбінації різних фрагментів виникла принципово нова споруда, яка відображала не лише реалістичність, а й властиві стилістичні та функціональні риси літнього кінотеатру (рис. 7).

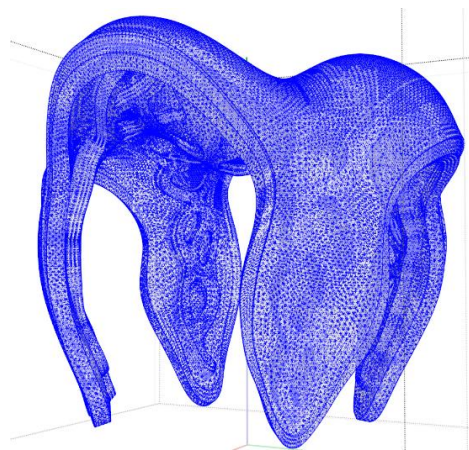


Рис. 7. 3D-створення високодеталізованої сітки моделі

ZBrush – це програмне забезпечення, що дозволяє архітекторам і дизайнерам створювати високополігональні мережі, які докладно відтворюють складні органічні форми, характерні для ландшафтно-архітектури. Завдяки використанню ZBrush можна ретельно відобразити всі деталі, включаючи текстури та рельєфи.

Після створення високодеталізованої 3D-моделі кінотеатру вона імпортується в інші програми для подальшої обробки. У рамках цієї роботи використано SketchUp. У SketchUp моделі оптимізуються за допомогою плагіна Skimp, щоб зменшити кількість полігонів і поліпшити продуктивність роботи з ними. Ця оптимізація дозволяє зберегти деталізацію моделей, але робить їх більш легкими для обробки (рис. 8).

Після оптимізації у SketchUp на моделі накладаються текстури та матеріали. Цей етап важливий для створення фотореалістичних візуалізацій, оскільки текстури додають моделям колір, структуру та реалістичний вигляд.

На основі 3D-моделі літнього кінотеатру створено точні технічні креслення з відповідними розмірами та деталями. Цей етап важливий для переходу від концепції та

візуалізації до робочої документації, необхідної для реалізації проекту.

Завдяки точним технічним кресленням визначено всі важливі параметри та розміри споруди. Це включає в себе розташування елементів, конструкційні деталі та матеріали, які будуть використані (рис. 8).

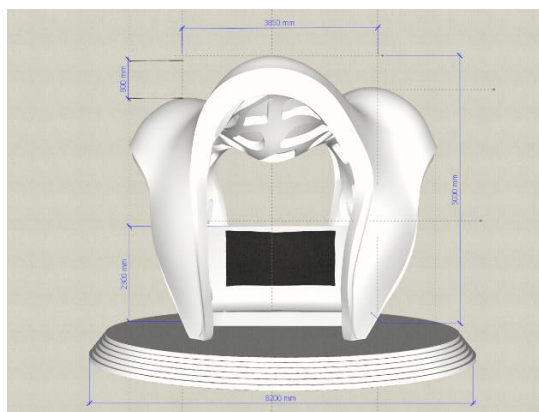


Рис. 8. Креслення та 3D-модель кінотеатру

У результаті цього процесу вдалося отримати докладну та реалістичну 3D-модель літнього кінотеатру, яка стала основою для подальших проектних рішень і візуалізацій проекту (рис. 9).

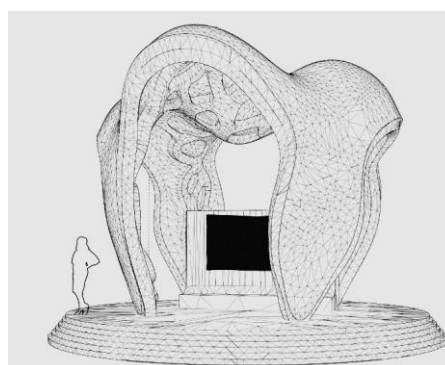
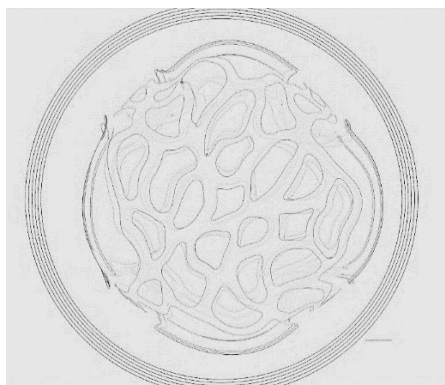
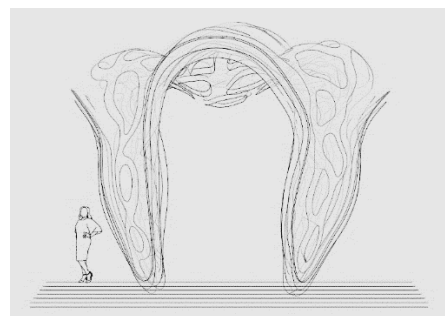


Рис. 9. Готове архітектурне рішення

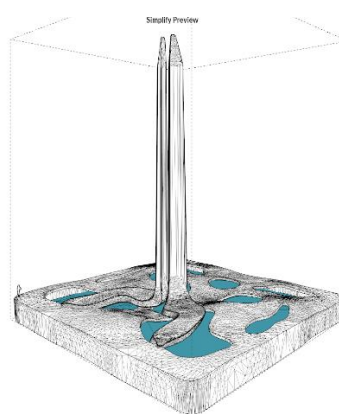
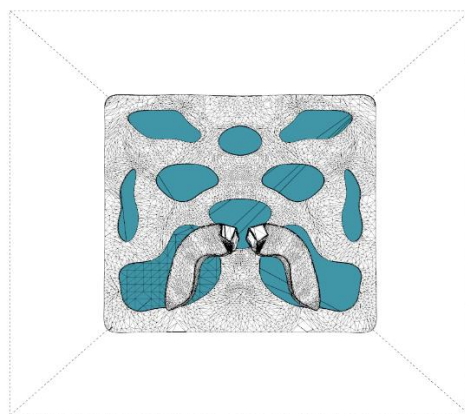


Рис. 10. Фонтан «Хвиля часу»

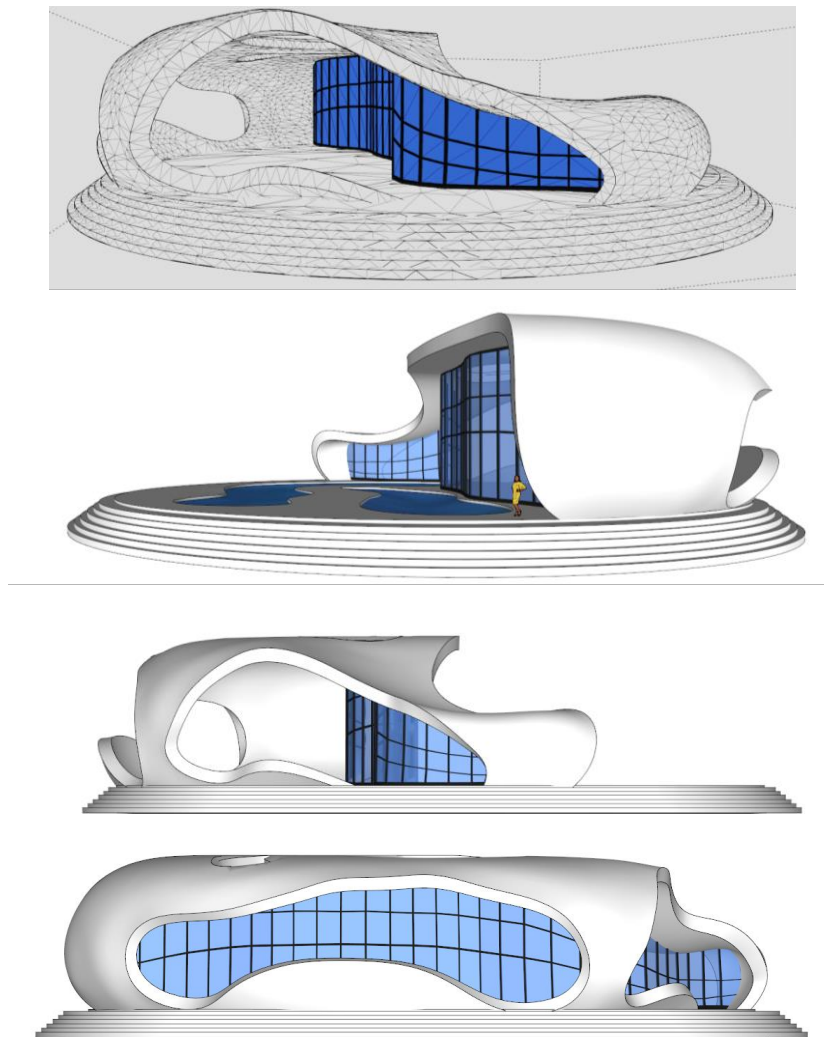


Рис. 11. Проект виставкового павільйону

Таким чином, на стадії створення літнього кінотеатру, фонтану «Хвиля часу» та павільйону застосовано методику, що базується на використанні нейромереж для генерації концептуальних ідей. Такий підхід дозволив ефективно експериментувати з різноманітними формами, текстурами та композиціями, щоб швидко отримувати візуальні результати.

Проект фонтану «Хвиля часу» наведено на рисунку 10, виставковий павільйон – на рисунку 11.

Висновки

Розглянуто проблематику використання генерації картинок-концепцій у сфері архітектури за допомогою платформи MidJourney та інших аналогічних інструментів, які використовують нейромережі для створення візуалізацій будівельних проектів.

Важливо розуміти, що для успішної роботи з генерацією картинок-концепцій в архітектурі необхідно мати глибокі знання в сфері архітектури та будівництва. Розуміння архітектурних принципів, конструкційних особливостей та технічних вимог – ключове для ефективного використання згенерованих візуалізацій у проектуванні.

Крім того, необхідно мати навички роботи з прикладними програмами для моделювання та візуалізації в тривимірному просторі, такими як ZBrush, SketchUp, Revit або Archicad, а також знання програм для роботи з графікою та обробки зображень, наприклад, Adobe Photoshop або Adobe Illustrator.

Бути фахівцем у сфері архітектури передбачає вміння поєднувати технічні знання з художнім баченням та творчістю. Тільки поєднуючи ці аспекти можна

створити візуалізації, які не лише естетично привабливі, а й відповідають вимогам та потребам конкретного архітектурного проекту.

Отже, для успішного використання генерації картинок-концепцій в архітектурі, необхідно мати комплексне розуміння архітектурного процесу, технічні навички роботи з програмним забезпеченням для моделювання та візуалізації, а також творчий підхід до виконання завдань проектування.

Цей підхід дозволяє архітекторам експериментувати з різноманітними стилями, структурами та об'ємами, швидко

та ефективно перетворюючи ідеї на конкретні образи. Візуалізації можуть слугувати джерелом натхнення для вирішення конкретних архітектурних проблем або стати основою для створення повноцінних проектів.

Таким чином, генерація картинок-концепцій відкриває безліч можливостей для творчого процесу та дозволяє архітекторам створювати інноваційні та унікальні проекти. Кожна картинка може бути вихідною точкою для нового проекту, а її елементи – будівельними блоками для формування найбільш вдалого та ефективного рішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Як епоха нейромереж змінює архітектуру. URL: <https://pragmatika.media/tsyfrochento-iak-epokha-neiromerezh-zminiuiie-arkhitekturu/> (дата звернення: 16.02.2024).
2. Як MidJourney перетворився на нескінченне джерело архітектурного натхнення. URL: <https://mpost.io/uk/how-midjourney-turned-into-an-endless-source-of-architectural-inspiration/> (дата звернення: 15.02.2024).
3. Живцова Л. І. Штучний інтелект: сутність та перспективи розвитку. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3. С. 66–71.
4. Про всі можливості MidJourney. URL: <https://freelancehunt.com/blog/pro-vsi-mozhливosti-midjourney/> (дата звернення: 25.02.2024).
5. Божко Т., Ареф'єв В. Нейронні мережі як інструмент графічного дизайну. *Вісник КНУКіМ. Серія: Мистецтвознавство*. 2023. № 48. С. 125–135.
6. Mustafa B. The Impact of Artificial Intelligence on the Graphic Design Industry. *Res Militaris*. 2023. № 3. Рр. 243–255. URL: <https://resmilitaris.net/menu-script/index.php/resmilitaris/article/view/3333> (дата звернення: 27.02.2024).
7. Цаценко Е. Як AI змінює архітектуру. URL: <https://skvot.io/uk/blog/yak-ai-zminyuye-arkhitekturu> (дата звернення: 10.02.2024).

REFERENCES

1. *Yak epokha neyromerezh zminyuye arkhitekturu* [How the age of neural networks changes architecture]. URL: <https://pragmatika.media/tsyfrochento-iak-epokha-neiromerezh-zminiuiie-arkhitekturu/> (date of application: 26.02.2024) (in Ukrainian).
2. *Yak MidJourney peretvoryvsya na neskinchenne dzherelo arkhitekturnoho natkhennya* [How MidJourney turned into an endless source of architectural inspiration]. URL: <https://mpost.io/uk/how-midjourney-turned-into-an-endless-source-of-architectural-inspiration/> (date of application: 15.02.2024) (in Ukrainian).
3. Zhyvtsova L. I. *Shtuchnyy intelekt: sutnist' ta perspektyvy rozvytku* [Artificial intelligence: essence and development prospects]. *Ukrayins'kyy zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 3, pp. 66–71. (in Ukrainian).
4. *Pro vsi mozhlyvosti MidJourney* [About all MidJourney features]. URL: <https://freelancehunt.com/blog/pro-vsi-mozhливosti-midjourney/> (date of application: 25.02.2024) (in Ukrainian).
5. Bozhko T. and Aref'yev V. *Neyronni merezhi yak instrument hrafichnoho dyzaynu* [Neural networks as a graphic design tool]. *Visnyk KNUKіM. Seriya: Mystetstvoznavstvo* [Bulletin of KNUKіM. Series: Art History]. 2023, no. 48, pp. 125–135. (in Ukrainian).
6. Mustafa B. The Impact of Artificial Intelligence on the Graphic Design Industry. *Res Militaris*. 2023, no. 3, pp. 243–255. URL: <https://resmilitaris.net/menu-script/index.php/resmilitaris/article/view/3333> (date of application: 27.02.2024).
7. Tsatsenko E. *Yak AI zminyuye arkhitekturu* [How AI is changing architecture]. URL: <https://pragmatika.media/tsyfrochento-iak-epokha-neiromerezh-zminiuiie-arkhitekturu/> (date of application: 10.02.2024) (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 20.02.2024.

УДК 620.181.4:691.714

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.26.1039

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТОВЩИНОЮ ТА СТРУКТУРНИМ СТАНОМ МЕТАЛОПРОКАТУ З НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ

БЕКЕТОВ О. В.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ЛАУХІН Д. В.², докт. техн. наук, проф.,
ДАДІВЕРІНА Л. М.³, канд. техн. наук, доц.,
КОЗЕЧКО В. І.⁴, асп.,
ТАРАНЕНКО А. О.⁵, інж.

^{1*} Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 585-54-29, e-mail: Laukhin.D.V@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 517-33-40, e-mail: Dadiverina.L.M@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4498-2184

⁴ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 650-90-22, e-mail: valont1975@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2370-1603

⁵ Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади», вул. Писаржевського, 1А, 49000, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0001-6370-4492

Анотація. У виборі сталей для проєктування висотних та великопрогінних будівель підвищеної несучої здатності доцільно віддавати перевагу товстолистовому прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей, оскільки він, за однакового рівня міцності з будівельними сталями, має більш високий рівень пластичності. При цьому проблема використання товстолистого прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей в будівельній індустрії полягає в анізотропії властивостей металопрокату, яка може підсилюватися зі збільшенням товщини металопрокату. Наразі в Україні контрольована прокатка – одна з найбільш перспективних технологій високотемпературної термомеханічної обробки для виробництва товстолистого металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. При цьому зі збільшенням товщини металопрокату, який виробляється за цією технологічною схемою, ефект регламентованого утворення структурного стану знижується через вплив на температуру поверхневих шарів металопрокату термодинамічного стану внутрішніх шарів та неспроможність наявного на вітчизняних підприємствах прокатного обладнання продеформувати метал по всій площі поперечного перерізу. Отже, актуальним бачиться отримання в товстолистовому металопрокаті такого структурного стану, який забезпечить зниження анізотропії властивостей, що дозволить використовувати такий металопрокат в будівельній індустрії. **Мета статті** – дослідження структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, яку вироблено за технологією контрольованої прокатки, залежно від товщини металопрокату. **Висновок.** Досліджено взаємозв'язок між структурним станом та товщиною металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, яку вироблено за технологією контрольованої прокатки. Встановлено, що зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням відсоткового вмісту перлітної фази. Показано, що зміни в мовах утворення структурних складових починаються за збільшення товщини металопрокату понад 30 мм, що пояснюється впливом температури внутрішніх шарів на процеси формування структурного стану, а саме зі збільшенням товщини металопрокату термодинамічна швидкість фазових перетворень у серединних шарах зразків металопрокату зменшується. Цей висновок підтверджується двома чинниками: по-перше, збільшенням розмірів перлітних колоній, по-друге, – зміною морфології цементитного каркаса перлітних колоній із зигзагоподібного (товщина 16...30 мм) на стрічковий (товщина 40...100 мм).

Ключові слова: структурний стан; контрольована прокатка; низьковуглецева низьколегована сталь; мікроструктура; формування мікроструктури; вміст структурних складових

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THICKNESS AND STRUCTURAL CONDITION OF ROLLED METAL FROM LOW CARBON LOW ALLOY STEEL 10G2FB

BEKETOV O.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LAUKHIN D.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DADIVERINA L.M.³, *PhD, Assoc. Prof.*,
KOZECHKO V.I.⁴, *PhD Student*,
TARANENKO A.O.⁵, *Engineer*

^{1*} Department of Fundamental and Natural Sciences, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 585-54-29, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (066) 517-33-40, e-mail: Dadiverina.L.M@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4498-2184

⁴ Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 650-90-22, e-mail: valont1975@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2370-1603

⁵ State Enterprise "Scientific-research and design-technological institute of the pipe industry named after Ya.Yu. Osada", 1a, Str. Pysarzhevskiyi, Dnipro, 49000, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-6370-4492

Abstract. When choosing steels for the design of high-rise and long-span buildings with increased load-bearing capacity, it is advisable to give preference to thick rolled steel from low-carbon, low-alloy steels, since it, with the same level of strength as construction steels, has a higher level of plasticity. At the same time, the problem of using thick rolled steel from low-carbon, low-alloy steels in the construction industry are the anisotropy of the rolled metal properties, which can increase with an increase in the thickness of the rolled metal. Currently, in Ukraine, controlled rolling is one of the most promising technologies of high-temperature thermomechanical processing for the production of thick rolled metal from low-carbon, low-alloy steels. At the same time, with an increase in the thickness of the rolled metal, which is produced with this technological scheme, the effect of the regulated formation of the structural state decreases due to the influence on the temperature of the surface layers of the rolled metal, the thermodynamic state of the inner layers and the inability of the rolling equipment available at domestic enterprises to deform the metal over the entire cross-sectional area. Therefore, the task of obtaining such a structural state in the thick sheet metal roll, which will ensure the reduction of the anisotropy of the properties, which will allow the use of such rolled metal in the construction industry, is urgent. **Purpose of the article** is to study of the structural state of low-carbon low-alloy steel 10G2FB, which was produced using the technology of controlled rolling, depending on the thickness of the rolled metal. **Conclusion.** The relationship between the structural state and the thickness of rolled metal from low-carbon low-alloy steel 10G2FB, which was produced by controlled rolling technology, was studied. It was established that with the increase in thickness, the percentage content of the ferrite component increases with a simultaneous decrease in the percentage content of the pearlite phase. It is shown that changes in the formation languages of structural components begin with an increase in the thickness of the rolled metal over 30 mm, which is explained by the influence of the temperature of the inner layers on the processes of forming the structural state, namely, with an increase in the thickness of the rolled metal, the thermodynamic rate of phase transformations in the middle layers of the rolled metal samples decreases. This conclusion is confirmed by two factors: firstly, an increase in the size of pearlite colonies, and secondly, a change in the morphology of the cementite framework of pearlite colonies from zigzag (thickness 16...30 mm) to ribbon (thickness 40...100 mm).

Keywords: *structural condition; controlled rolling; low-carbon low-alloy steel; microstructure; microstructure formation; content of structural components*

Постановка проблеми. У виборі сталей для проєктування висотних та великопрогінних будівель підвищеної несучої здатності доцільно віддавати перевагу товстолистовому прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей, оскільки він, за однакового рівня міцності з

будівельними сталлями, має більш високий рівень пластичності. Незважаючи на порівняно високу вартість цих сталей, використання їх у промисловому і цивільному будівництві стало економічно доцільним, завдяки економії грошових витрат за рахунок зменшення вартості

монтажу, транспортування, зварювальних робіт, об'єму наплавленого матеріалу тощо [1].

Разом із цим проблема використання товстолистового прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей в будівельній індустрії полягає в анізотропії властивостей металопрокату [2]. Тобто під час виробництва зварних металевих конструкцій із зазначеного типу сталей та подальшої їх експлуатації може постати проблема фізичної нелінійності (термінологія згідно з вимогами [3]). При цьому низка експериментальних досліджень (див., наприклад, роботи [4; 5]) показують, що ефект фізичної нелінійності збільшується зі збільшенням товщини металопрокату. Отже, актуальним бачиться завдання отримання в товстолистовому металопрокаті такого структурного стану, який забезпечить зниження анізотропії властивостей, що дозволить використовувати такий металопрокат у будівельній індустрії.

Аналіз публікацій. Наразі в Україні контрольована прокатка – одна з найбільш перспективних технологій високо-температурної термомеханічної обробки для виробництва товстолистового металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. Це пояснюється тим, що технологічна схема контрольованої прокатки надає можливість одночасного підвищення міцності, пластичності, в'язкості і холодостійкості за рахунок отримання в процесі гарячої прокатки дрібного зерна фериту в поєднанні з ефектом дисперсійного зміцнення.

Найважливіша особливість металу, виробленого за технологією контрольованої прокатки, полягає в наявності мікродобавок потужних карбідоутворюючих елементів. Параметр решітки карбідів і нітридів прямо впливає на можливість зміцнення шляхом дисперсійного твердіння під час прокатки [6].

Таким чином, структурний стан, що утворюється внаслідок застосування контрольованої прокатки, залежить від [7]:

- температури перетворення аустеніту: чим нижча температура перетворення аустеніту, тим менший розмір кінцевого зерна фериту;

- величини вихідного зерна аустеніту: феритна складова зароджується переважно на границях колишніх зерен аустеніту;

- морфології аустенітного зерна;

- утворення частинок другої фази, які виділяються в феритному зерні.

Разом із цим, зі збільшенням товщини металопрокату, який виробляється за технологією контрольованої прокатки, ефект регламентованого утворення структурного стану знижується за рахунок двох факторів:

- розігріву металу за рахунок тепла внутрішніх шарів (чинить суттєвий вплив у разі товщини металопрокату понад 40 мм);

- неспроможності наявного на підприємствах України прокатного обладнання продеформувати метал по всій площі поперечного перерізу (має місце для товщин металопрокату більших за 20 мм).

Мета статті – дослідження структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, яку вироблено за технологією контрольованої прокатки, залежно від товщини металопрокату.

Результати досліджень. Як матеріал для дослідження обрано низьковуглецеву низьколеговану сталь 10Г2ФБ в товщинах: 16, 20, 30, 40, 50, 70, 100 мм. Відповідний для кожної товщини хімічний склад (усереднений) наведено в таблиці 1. Хімічний склад зразка визначався за допомогою приладу «SPECTROMAX» згідно з рекомендаціями [8].

Дослідження структурного стану здійснювали із застосуванням растрового електронного мікроскопа РЕМ-106І згідно з рекомендаціями, наведеними у праці [9]. Кількісний аналіз структурного стану робили згідно з пропозиціями, викладеними в праці [8].

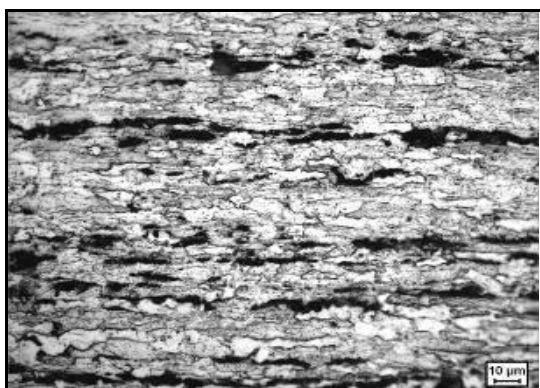
Аналіз морфології структурного стану зразків сталі 10Г2ФБ (рис. 1, 2) показав, що для всіх досліджуваних товщин структура сталі являє собою ферито-перлітний

конгломерат. Феритні зерна мають колонії квазіевтектоїду. поліедричну форму. Перліт являє собою

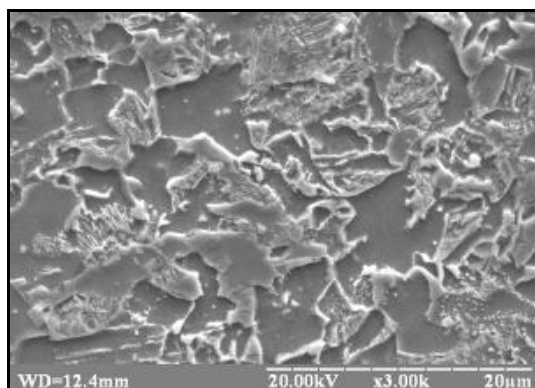
Таблиця 1

Хімічний склад сталі 10Г2ФБ

Товщина, мм	Елемент, %									
	C	Mn	Si	S	Cr	Ni	Ti	Mo	V	Nb
16	0,15	1,29	0,25	0,004	0,02	0,01	0,016	0,002	0,062	0,04
20	0,16	1,28	0,24	0,004	0,02	0,01	0,015	0,001	0,061	0,038
30	0,16	1,26	0,23	0,004	0,02	0,01	0,015	0,002	0,062	0,038
40	0,16	1,27	0,26	0,003	0,02	0,01	0,016	0,002	0,059	0,042
50	0,17	1,37	0,21	0,004	0,03	0,02	0,014	0,006	0,046	0,037
70	0,17	1,43	0,19	0,004	0,08	0,02	0,015	0,009	0,036	0,016
100	0,18	1,43	0,34	0,003	0,04	0,02	0,014	0,002	0,036	0,024



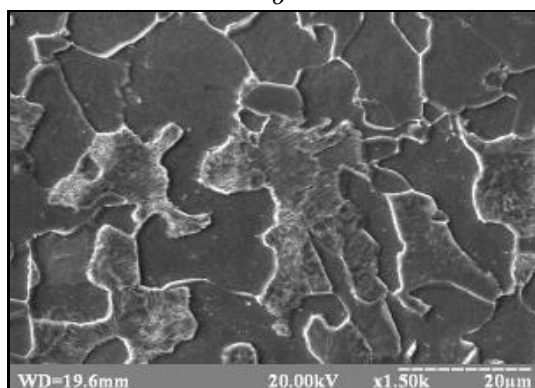
a



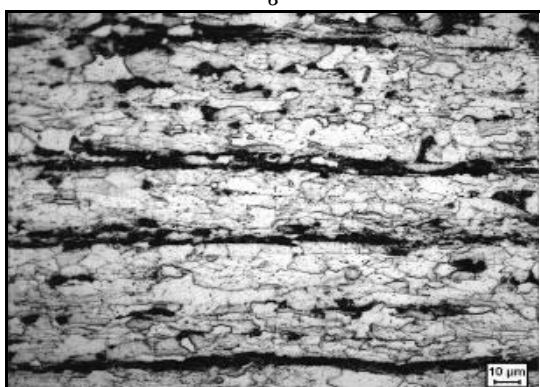
б



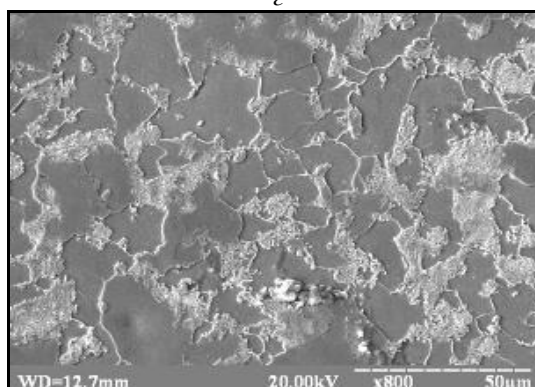
в



г



д



е

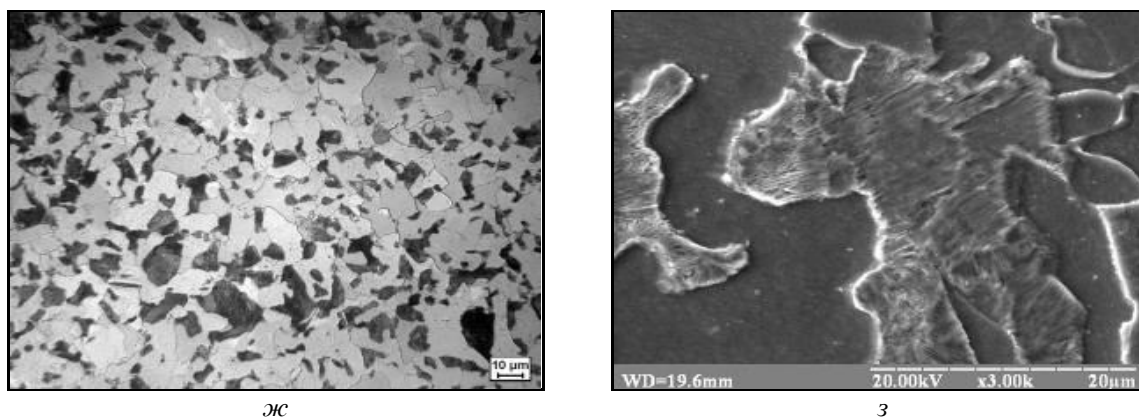


Рис. 1. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ в товщинах: а, б – 16 мм; в, г – 20 мм; д, е – 30 мм; ж, з – 40 мм

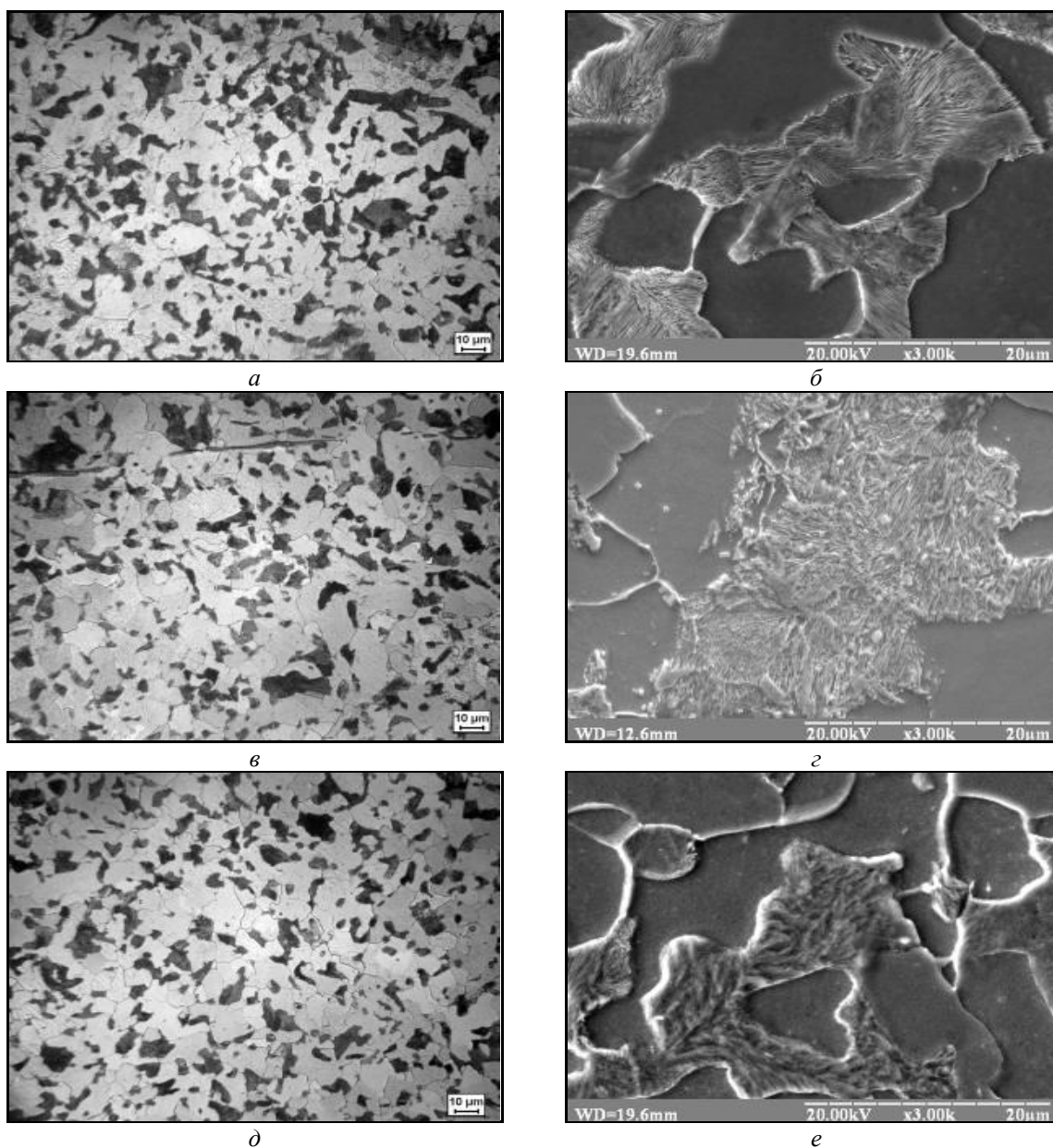


Рис. 2. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ в товщинах: а, б – 50 мм; в, г – 70 мм; д, е – 100 мм

Результати проведених досліджень показали, що при товщинах 16...30 мм

структурний стан формується за добре описаним у літературі механізмом фазових

перетворень, які відбуваються під час контрольованої прокатки [10]. Відповідно до запропонованих концепцій, зародки нових фаз з'являються найчастіше на поверхні зерен аустеніту й включень. Надалі відбувається поступове зростання цементиту й фериту у вигляді приблизно рівновісних утворень.

У деякий момент на границях зерен виникають зародки цементиту, які ростуть у вигляді пластин усередину зерна. На поверхні кожної пластини цементиту, як на підкладці, кристалізується ферит, чому сприяє збагачення цієї ділянки аустеніту залізом. Ріст пластини фериту викликає збагачення вуглецем сусідньої ділянки аустеніту, що полегшує появу нового зародка цементиту.

Таким чином, позмінна перекристалізація цементиту й фериту поширюється уздовж границь. З'являються колонії перліту, ріст яких триває до їх взаємного зіткнення (див., наприклад, рис. 1 з). При цьому форму цементитного каркасу можливо віднести до зигзагоподібного типу (згідно з даними [11]). Також при зазначених товщинах у структурі спостерігається так звана перлітна смугастість (чергування смужок фериту та перліту, див. рис. 1 а, в, д), притаманна сталям, які виготовлені саме за

технологічною схемою контрольованої прокатки [6; 7].

При товщинах більших 30 мм перлітна складова не утворює смуги, а рівномірно розподіляється по об'єму металу (рис. 1 ж; рис. 2 а, в, д). Це свідчить, що при збільшенні товщини понад 30 мм температура внутрішніх шарів безпосередньо впливає на процеси формування структурного стану. Як наслідок, встигає відбутися перерозподіл зернограничної субструктури: міграція границь шляхом збільшення геометричних розмірів аустенітних зерен і, як наслідок, зменшення потенційних місць зародження фериту. Це спричинює одночасне збільшення розмірів феритної (див. рис. 2 б) і зміни умов (у першу чергу, швидкості охолодження) формування перлітної складових, що підтверджується зміною, зі збільшенням товщини металопрокату, форми цементитного каркасу перлітних колоній з зигзагоподібного (див. рис. 1 б, г, е) на стрічковий (див. рис. 2 б, г, е) відповідно до класифікації, яку запропоновано у роботі [11].

Кількісний аналіз відсоткового вмісту структурних складових та результати кількісної оцінки розмірів структурних складових (феритних зерен та колоній перліту) наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати кількісної оцінки параметрів структурного стану

Товщина металопрокату, мм	Відсотковий вміст структурних складових, %		Розмір структурних складових, мкм	
	ферит	перліт	ферит	перліт
16	80	20	7	7
20	85	15	8	0
30	75	25	9	11
40	80	20	13	13
50	80	20	4	14
70	75	25	15	16
100	75	25	18	17

Сумісний аналіз даних рисунків 1...3 та таблиць 2, 3 показує, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зростання розмірів структурних складових, при цьому їх відсоткове співвідношення майже не змінюється (зміни перебувають у межах допустимої похибки). Цей факт

також можливо пояснити впливом термодинамічного стану внутрішніх шарів на фазові перетворення, які відбуваються у разі переохолодження аустеніту. Тобто зі збільшенням товщини металопрокату термодинамічна швидкість фазових перетворень у серединних шарах зразків

металопрокату зменшується. Підтвердженням цього є, по-перше, збільшення розмірів перлітних колоній, по-друге, зміна морфології цементитного каркаса. Згідно з результатами, отриманими в роботі [11], зигзагоподібна форма цементитного каркасу перлітної колонії (спостерігається для товщин 16...30 мм) утворюється зі швидкістю охолодження, більшою, ніж стрічкова (спостерігається для товщин 40...100 мм).

Висновки

1. Досліджено взаємозв'язок між структурним станом та товщиною металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, виробленої за технологією контрольованої прокатки.

2. Проведений комплекс досліджень показав, що для усіх товщин, які розглядалися в роботі, структура містить феритно-перлітний конгломерат у різному відсотковому співвідношенні. Ферит формується у вигляді зерен поліедричної форми, а перлітна складова являє собою колонії квазіевтектоїду.

3. Дослідженнями встановлено, що зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням відсоткового

вмісту перлітної фази. Для сталі товщиною 100 мм мікроструктура складається з 80% фериту та 20% перліту.

4. Результати проведених досліджень показали, що зміни в умовах утворення структурних складових починаються при збільшенні товщини металопрокату понад 30 мм. При товщинах металопрокату 16...30 мм спостерігається перлітна смугастість, притаманна сталям, які виготовлені саме за технологічною схемою контрольованої прокатки.

Разом із цим, при товщинах більших за 30 мм перлітна складова не утворює смуги, а рівномірно розподіляється по об'єму металу. Таку зміну морфології можливо пояснити впливом температури внутрішніх шарів на процеси формування структурного стану, а саме зі збільшенням товщини металопрокату термодинамічна швидкість фазових перетворень у серединних шарах зразків металопрокату зменшується.

Цей висновок підтверджується двома чинниками: по-перше, збільшенням розмірів перлітних колоній, по-друге, зміною морфології цементитного каркаса перлітних колоній із зигзагоподібного (спостерігається для товщин 16...30 мм) на стрічковий (спостерігається для товщин 40...100 мм).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гезенцевей Ю. І. Внутрішні критерії оцінки якості конструктивних рішень при проектуванні сталевих будівельних конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2020. № 4. С. 40–42. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21RE F=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP meta&C21COM=S&2 S21P03=FILE=&2 S21STR=Pbis 2020 4
2. Гезенцевей Ю. І., Большаков В. І. Формування полігонізованої структури в товстолистовому прокаті для забезпечення механічних властивостей у трьох напрямках. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 2 (002). С. 55–61. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/235816>
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 197 с. URL: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3022132243112920267/2023-01-23/f8e72731-4394-4c5c-825f-0eff1fc3281a.pdf
4. Honeycombe R. W. K., Bhadeshia H. K. D. H. Steels. Microstructure and properties. London : Edward Arnold, 1995. 323 p. URL: <https://search.worldcat.org/title/steels-microstructure-and-properties/oclc/33045504>
5. Gladman T., Dulieu D., McIvor I.D. Structure–property relationships in high strength microalloyed steels. International Conference “Micro–Alloying-75”, Washington, USA, 1-3 october 1975. Ohio : Metals park, 1975. Pp. 32–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/306134928_Evolution_of_Microalloyed_Steels_Since_Microalloying_75_with_Specific_Emphasis_on_Linepipe_and_Plate
6. Beketov O., Laukhin D., Rott N., Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. Pp. 13–19. URL: <https://www.scientific.net/SSP.291.13>
7. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. Ohio : ASM International, Metals park, 2006. 593 p. URL: <https://www.asminternational.org/wp-content/uploads/files/23403074/23403074-toc.pdf>

8. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Лаухин Д. В. Атлас металлов и сплавов : учеб. пособ. Днепропетровск : ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», 2010. 174 с. URL : <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/05/bolshakov-vy-atlas-struktur-metallov-y-splavov.pdf>
9. Stokes D. J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 221 p. URL : https://www.researchgate.net/publication/285935810_Principles_and_Practice_of_Variable_PressureEnvironmental_Scanning_Electron_Microscopy_VP-ESEM
10. Лаухін Д. В., Ротт Н. О., Бекетов О. В., Пустовой Д. С., Письменкова Т. О., Бабенко Є. О. Дослідження структури і властивостей будівельних сталей після безперервної контрольованої прокатки. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Вип. 91. С. 49–57. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/article/view/220041>
11. Бекетов О. В. Теоретичні основи формування субструктури переохолодженого аустеніту та механічних властивостей мікролегованих будівельних сталей : дис. ... док. техн. Наук : 05.02.01. Дніпро : ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2020. 340 с. URL: https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2021/04/diser_Beketov.pdf

REFERENCES

1. Hezentsvey Yu.I. *Vnutrishni kryteriyi otsinky yakosti konstruktyvnykh rishen' pry proyektuvanni stalevykh budivel'nykh konstruktсий* [Internal criteria for assessing the quality of structural solutions in the design of steel building structures]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial Civil Engineering and Engineering Structures]. 2020, no. 4, pp. 40–42. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Pbis_2020_4_8 (in Ukrainian).
2. Hezentsvey Yu.I. and Bol'shakov V.I. *Formuvannya polihonizovanoyi struktury v tovstolystovomu prokati dlya zabezpechennya mekhanichnykh vlastyvostry u tr'okh napryamakh* [Formation of a polygonized structure in thick rolled steel to ensure mechanical properties in three directions]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 2 (002), pp. 55–61. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/235816> (in Ukrainian).
3. *DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruktсийi. Normy proektuvannya* [DBN V.2.6-198:2014 Steel structures. Design standards]. Kyiv Minrehion Ukrayiny Publ., 2014, 197 p. URL : https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3022132243112920267/2023-01-23/f8e72731-4394-4c5c-825f-0eff1fc3281a.pdf (in Ukrainian).
4. Honeycombe R.W.K. and Bhadeshia H.K.D.H. Steels. Microstructure and properties. London : Edward Arnold, 1995, 323 p. URL: <https://search.worldcat.org/title/steels-microstructure-and-properties/oclc/33045504>
5. Gladman T., Dulieu D. and McIvor I.D. Structure–property relationships in high strength microalloyed steels. International Conference “Micro–Alloying '75”, Washington, USA, 1–3 October 1975, Ohio : Metals park, 1975, pp. 32–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/306134928_Evolution_of_Microalloyed_Steels_Since_Microalloying_'75_with_Specific_Emphasis_on_Linepipe_and_Plate
6. Beketov O., Laukhin D., Rott N. and Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019, vol. 291, pp. 13–19. URL : <https://www.scientific.net/SSP.291.13>
7. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. Ohio : ASM International, Metals park, 2006, 593 p. URL: <https://www.asminternational.org/wp-content/uploads/files/23403074/23403074-toc.pdf>
8. Bolshakov V.I., Sukhomlin G.D. and Laukhin D.V. *Atlas metallov i splavov : uchebnoye posobiye* [Atlas of metals and alloys : textbook]. Dnipropetrovsk : SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 2010, 174 p. URL : <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/05/bolshakov-vy-atlas-struktur-metallov-y-splavov.pdf> (in Russian).
9. Stokes D.J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008, 221 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/285935810_Principles_and_Practice_of_Variable_PressureEnvironmental_Scanning_Electron_Microscopy_VP-ESEM
10. Laukhin D.V., Rott N.O., Beketov O.V., Pustovoy D.S., Pys'menkova T.O. and Babenko Ye.O. *Doslidzhennya struktury i vlastyvostry budivel'nykh staley pislya bezpererвної kontrol'ovanoi prokatky* [Study of the structure and properties of structural steels after continuous controlled rolling]. *Visnyk KHNADU* [Herald of the KhNASM]. 2020, no. 91. pp. 49–57. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/article/view/220041> (in Ukrainian).
11. Beketov O.V. *Teoretychni osnovy formuvannya substruktury pereokholodzhеноho austenitu ta mekhanichnykh vlastyvostry mikrolegovanykh budivel'nykh staley : dys. ... dok. tekhn. Nauk : 05.02.01* [Theoretical basis of substructure formation of supercooled austenite and mechanical properties of microalloyed structural steels : Dys. ... Dr. Tech. Sc. : 05.02.01]. Dnipro : SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 2020, 340 p. URL : https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2021/04/diser_Beketov.pdf (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 01.03.2024.

УДК 624.05:691.32

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.34.1040

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЗВЕДЕННЯ ТА РЕМОНТУ ЦИВІЛЬНИХ БУДИНКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ

ГАРКУША В. С.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
СИМОНОВ С. І.², канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра архітектури, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, 87555, Маріуполь, Україна, тел.: +38 (099) 772-68-78, e-mail: harkusha_v_s@pstu.edu, ORCID ID: 0000-0002-5016-0737

² Кафедра архітектури, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, 87555, Маріуполь, Україна, тел.: +38 (050) 590-61-91, e-mail: arhsimonov1@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3921-0131

Анотація. Постановка проблеми. Особливості зведення цивільних будинків полягають у забезпеченні зменшення енерговитрат, витрат на їх утримання та гармонійне поєднання з міським середовищем; зменшення вартості будинків, які здаються до експлуатації; скорочення тривалості спорудження цивільних будівель. У процесі зведення цивільних будинків може виникати велика кількість неузгоджених між собою операцій, які спричиняють зниження якості готового житла та матеріальні збитки. Завдяки використанню ВІМ-технологій можливо максимально врахувати подібні неузгоджені моменти та зробити процес будівництва більш ефективним. **Мета статті** – аналіз практичного досвіду використання ВІМ-технологій для зведення та ремонту цивільних будівель, у тому числі використання бетонів із полімерними добавками як матеріалу для ремонту цивільних будинків з погляду збільшення терміну їх експлуатації. **Висновок.** Наразі сфера будівельного виробництва змінюється досить динамічно. Зовсім недавно не було матеріалів, які б дозволяли досягти якісно інших результатів. Це насамперед полімерні добавки до бетонів, які наразі представлені у великій кількості. Однак використання полімерних добавок потребує повного обсягу знань про їх властивості. Це необхідно тому, що такі компоненти у разі недотримання правил їх використання можуть звести нанівець зусилля всіх учасників проекту. Навіть якщо мати достатній рівень знань про компоненти, які використовує те чи інше виробництво, бувають ситуації, коли погодні умови можуть кардинально змінити результат будівельних робіт, але не завжди у більш вигідний бік. Важливо враховувати не тільки інформацію про взаємодію багатьох факторів, а й необхідність зведення цивільної будівлі, яка задовольняє теплотехнічним характеристикам сучасного будівництва. Від цього залежить не тільки прибуток від запланованого проекту, а й умови проживання та комфорт багатьох поколінь населення нашої країни.

Ключові слова: цивільний будинок; бетон; полімерні добавки; довговічність; енергоефективність; ВІМ-технології

BASIC PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND REPAIR OF CIVIL BUILDINGS USING BIM-TECHNOLOGIES

HARKUSHA V.S.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
SYMONOV S.I.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Department of Architecture, SHEI "Azov State Technical University", 7, Universytetska Str., Mariupol, 87555, Ukraine, tel.: +38 (099) 772-68-78, e-mail: harkusha_v_s@pstu.edu, ORCID ID: 0000-0002-5016-0737

² Department of Architecture, SHEI "Azov State Technical University", 7, Universytetska Str., Mariupol, 87555, Ukraine, tel.: +38 (050) 590-61-91, e-mail: arhsimonov1@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3921-0131

Abstract. Problem statement. The peculiarities of the construction of civilian buildings consist in ensuring a reduction in energy consumption, costs for their maintenance and a harmonious combination with the urban environment; the cost reduction of buildings that are rented out; reducing the duration of civil buildings construction. In the process of building civil buildings, a large number of uncoordinated operations may occur, which lead to a decrease in the quality of the finished housing and material losses. Thanks to the use of BIM-technologies, it is possible to maximally take into account such inconsistent moments and make the construction process more efficient. **Purpose of the article** is to analyse the practical experience of BIM-technologies using for the construction and repair of civil buildings, including the use of concrete with polymer admittures as a material for the repair of civil buildings from the point of view of increasing their service life. **Conclusion.** Today, the sphere of construction production is changing quite dynamically. More recently, there were no materials that would allow to achieve qualitatively different results.

These are primarily polymer additives for concrete, which are currently available in large quantities. However, the use of polymer additives requires a full knowledge of their properties. This is necessary for the reason that such components, in case of non-compliance with the rules of their use, can nullify the efforts of all project participants. If you have a sufficient level of knowledge about the components used by this or that production, there are situations when weather conditions can radically change the result of construction work, but not always in a more favorable direction. It is important to take into account not only information about the interaction of many factors, but also the need to build a civil building that meets the thermal and technical characteristics of modern construction. Not only the profit from the planned project depends on this, but also the living conditions and comfort of many generations of the population of our country.

Keywords: *civil building; concrete; polymer admixtures; durability; energy efficiency; BIM-technologies*

Постановка проблеми. У світовій практиці зведення будівель та споруд використовують технології інформаційного моделювання, які називаються *BIM-технології*, – процес створення та використання інформації про споруду, який формує надійну основу для всіх рішень протягом усього життєвого циклу об'єкта (від ранніх концепцій до робочого проектування, будівництва, експлуатації та знесення).

Стратегія переходу на *BIM-технології* передбачає два підходи: *Pull* і *Push*. *Pull* значить збір інформації у необхідному форматі і в необхідний час. *Push* передбачає забезпечення максимально легкого переходу на *BIM-технології* для всіх учасників будівельного ринку.

Реалізація сучасних вимог скорочення термінів і особливості проектування, оптимізації проектних рішень стають основними у проектуванні нових будівель і споруд, забезпечення необхідною інформаційною підтримкою проекту впродовж усього його життєвого циклу неможливе без застосування спеціальних *BIM* (Building Information Modelling) технологій у проектуванні будівельних об'єктів.

Будівельні об'єкти вже давно розглядаються з урахуванням усіх фаз: проектування, будівництва, експлуатації. Детальний і відповідальний висновок щодо вартості різних варіантів будівництва потрібен ще до початку проектування. На стадії проектування необхідно виконати як мінімум три умови:

- забезпечити максимальну ясність щодо всіх компонентів будівлі, її оснащення, організації будівництва і т. п;

- мати можливість оперативно вносити зміни до проекту, враховуючи нові побажання замовника які постійно виникають, «не змінюючи відведених на все термінів»;
- за кожної зміни проекту, в кожному новому варіанті оперативно отримувати його економічну характеристику і решту всієї технічної інформації [1].

Аналіз публікацій. Розроблення *BIM-моделі* на етапі проектування будинку суттєво зменшує капітальні витрати під час будівництва та забезпечує можливість отримати енергоефективну будівлю, яка відповідає заявленим показникам.

До принципів енергоефективності належить низка критеріїв:

- правильна орієнтація за сторонами світу;
- урахування кліматичних та геодезичних особливостей плями забудови;
- вибір ефективного архітектурного рішення з підвищеною компактністю форми будівлі;
- правильний вибір планувальних рішень із розташуванням житлових приміщень;
- обмеження коефіцієнта застлянення фасадів на рівні 18–20 %;
- масивна теплоізоляція;
- енергоефективні вікна;
- конструювання без теплових мостів, однорідність;
- герметичність будівельних конструкцій та вузлів примикання;
- примусова вентиляція з рекуперацією.

У проектуванні будівлі слід враховувати тепловтрати, які можуть бути трансмісійні: через стіни, дах, підвал, вікна, та фільтраційні – через нещільність в оболонці будівлі та системі вентиляції [2; 3].

Заходи з підвищення енерго-ефективності цивільного будинку: встановлення енергоефективних вікон та утеплення фасаду наведено на рисунку 1.

Найбільш ефективний матеріал для зведення цивільних будинків – бетон. Він здатен витримувати різноманітні впливи навколишнього середовища. Головна його особливість у тому, що він набагато краще

витримує навантаження на стиск порівняно з іншими видами навантажень. Тому необхідно вжити заходів до поліпшення сприйняття ним навантажень інших видів. Для цих цілей застосовують армування конструкцій металевими виробами, дисперсне армування різними матеріалами, введення різних добавок.



Рис. 1. Заходи з підвищення енергоефективності цивільного будинку: утеплення фасаду та встановлення енергоефективних вікон

Суттєво підвищити довговічність та якість бетону залізобетонних виробів можна за рахунок уведення хімічних добавок, які дозволяють поліпшити властивості та структуру бетону. Існує багато добавок вітчизняних виробників, які своїми властивостями не поступаються закордонним, але в багатьох конструкціях і виробках вони не застосовуються, тому що нормативні документи висувають дуже жорсткі вимоги щодо їх використання.

Ці вимоги щодо міцності, морозостійкості, водонепроникності, стійкості до агресивної дії рідких середовищ, стирання, тріщиностійкості і довговічності. Актуальним постає питання забезпечення високої технологічності цементних систем при низькому водо-цементному співвідношенні, рухливості бетонних сумішей, економії цементу та енергоносіїв [4; 5].

Частка бетонів з умістом добавок невпинно зростає, у промислово розвинених

країнах не менше 90 % цементного бетону випускають із хімічними добавками. Хімічні добавки застосовують практично у всіх технологіях виробництва бетону, що сприяє появі нових технологій, реалізувати які без добавок просто неможливо. Завдяки добавкам сучасний бетон перетворюється на все складніший композиційний матеріал, властивості якого можуть набагато перевершувати традиційний склад бетону.

У комплексну добавку повинен входити ефективний суперпластифікатор, а також можливі добавки, які керують кінетикою тужавлення і твердіння, повітровтягуючі добавки і піногасники, дисперсні і тонкодисперсні мінеральні наповнювачі. Склад комплексної добавки повинен відповідати вибраній технології і заданим властивостям бетону.

Значну увагу приділяють відновленню міцності та роботоздатності пошкоджених бетонних та залізобетонних конструкцій тривалої експлуатації. Для залізобетонних

споруд ситуація загострюється через їх розтріскування внаслідок корозії сталевих арматур, через що збільшується сумарний об'єм металу і продуктів корозії, а, отже, виникають розтягувальні напруження у бетонних матрицях. Утворення в бетоні тріщиноподібних дефектів – основна загроза міцності та довговічності таких конструкцій, тому, «заліковуючи» (усуваючи) їх, можна поліпшити ці характеристики [6].

Деякі з конструкцій піддаються впливу особливих умов. Наприклад, напівзмінного зволоження та висушування, заморожування та відтавання, постійної дії вологи, навантаження різного виду та їх поєднання тощо. Для надійної та тривалої експлуатації таких будівель вкрай важливе застосування якісних матеріалів, які будуть відповідати всім вимогам їх застосування.

Закладні деталі залізобетонних конструкцій, що експлуатуються, можуть перебувати під впливом корозійного середовища або циклічних експлуатаційних та кліматичних навантажень (вітру, температури). Це може спричинити корозію та виникнення тріщиноподібних

пошкоджень в анкерах протягом їх експлуатації і збільшити ризик руйнування закладних деталей. Наслідком руйнування закладних деталей може стати обвалення конструкцій [7].

Значна частина житлово-будівельного фонду та інших бетонних і залізобетонних споруд – це об'єкти, що вже тривалий час експлуатуються і потребують ремонту через виникнення в них різних пошкоджень. Один із перспективних способів відновлення пошкоджених елементів конструкцій – це технології ін'єктування дефектних зон, які передбачають заповнення пошкоджених місць бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд (у вигляді тріщин, порожнин, викришувань, відшаровувань тощо) рідкими (найчастіше полімерними) матеріалами, здатними після кристалізації або полімеризації формувати з бетонною матрицею міцні адгезійні зв'язки [8].

Типове пошкодження цивільного будинку та споруди (тріщини, сколи, корозія бетону та металевих елементів) показано на рисунку 2.



Рис. 2. Типове пошкодження цивільного будинку: тріщини, сколи, корозія бетону та металевих елементів

Мета статті – аналіз практичного досвіду використання ВІМ-технологій для зведення та ремонту цивільних будівель, у тому числі використання бетонів із полімерними добавками як матеріалу для ремонту цивільних будинків з поглядом збільшення терміну їх експлуатації.

Результати досліджень. Процеси формування міського середовища останніми десятиліттями активно впливають на вигляд сучасного міста. Умови та обмеження забудови земельної ділянки повинні забезпечувати показники щодо таких вимог:

- гранично допустима висота будівель;

- максимально допустимий відсоток забудови земельної ділянки;
- максимально допустима щільність населення (для житлової забудови);
- відстані від об'єкта, який проектується, до меж червоних ліній та ліній регулювання забудови;
- планувальні обмеження (зони охорони пам'яток культурної спадщини, межі історичних ареалів, прибережні захисні смуги, санітарно-захисні та інші охоронні зони);
- мінімально допустимі відстані від об'єктів, які проектуються, до інших будинків та споруд;
- зони інженерних комунікацій, які охороняються;
- вимоги до необхідності проведення інженерних вишукувань згідно з державними будівельними нормами;
- вимоги щодо благоустрою (зокрема, щодо відновлення благоустрою);
- забезпечення умов транспортно-пішохідного зв'язку [9].

Слід зазначити, що в умовах сучасного виробництва існує багато вузьких місць, які впливають на якість та довговічність нових цивільних будівель. Це, перш за все, виготовлення та доставка бетонної суміші на будівельний майданчик.

Використання полімерних добавок до бетону дає можливість отримувати матеріал високої якості. Однак уведення таких компонентів часто ускладнює процес будівельного виробництва.

Ці складності пов'язані з погодними умовами. Найбільш критичні ситуації виникають у літню спеку, зимовий холод та за випадання опадів. Передбачити поведінку полімерної добавки в таких умовах достить важко.

В Україні досить відомі добавки до бетону типу *Real Vibro* та *Real Flow*, а також добавки на основі *полікарбоксилату*. Всі ці речовини ефективні, однак є низка технологічних особливостей, які слід враховувати у роботі з ними.

Найбільш вірогідною може бути ситуація з літньою спекою. Більшість заводів, які виготовляють товарний бетон

або збірний залізобетон в Україні, мають відкриті склади інертних матеріалів. Через це у літню спеку пісок та щебінь нагріваються до високих температур, що впливає на процес виготовлення бетонної суміші.

До мішалки потрапляють гарячі наповнювачі (пісок, гранітний щебінь), тому вода із бетонної суміші починає інтенсивно випаровуватись. Цей ефект стає особливо критичним, якщо використовується добавка типу *Real Vibro*, тому що її додають до жорстких бетонів (марки Ж1...Ж2), які містять мінімальну кількість води. Комбінація гарячих наповнювачів та добавки *Real Vibro* може спричинити те, що до місця формування виробів (методом вібропресування) бетонна суміш буде доставлена абсолютно сухою та непридатною до роботи. Такий випадок з погляду використання *VIM*-технологій є абсолютно неприйнятний.

Варто зазначити, що не менш важливою бачиться ситуація з використанням добавки типу *Real Flow* в умовах осіннього дощового періоду. Цю добавку використовують для виготовлення бетону, який має більшу рухомість (марки П1...П3). У такому випадку матимемо інший ефект: до мішалки будуть потрапляти надто холодні та вологі наповнювачі (пісок, гранітний щебінь), отож підібрати кількість води замішування для бетонної суміші буде майже неможливо. У випадку з холодними наповнювачами бетонна суміш має здатність до зменшення в об'ємі і, як це не парадоксально, також потребує великої кількості води замішування. Бетонна суміш може стати рідкою та навіть розшаруватися, що також вважається браком, не придатним до формування виробів.

Обидві ці ситуації критичні з точки зору вузьких місць у технології будівельного виробництва та потребують підвищення кількості бетону, який вважається некондицією та може бути не тільки не прийнятний, а і повернутий замовником, що досить часто має місце.

Наразі не менш популярні добавки в бетон на основі *полікарбоксилату*.

Полікарбоксилатні добавки надають бетонній суміші здатності до текучості та дозволяють знизити кількість води замішування на 40...50 %, що має дуже значний ефект з точки зору стійкості бетону до руйнівних навантажень, стирання, дії агресивних середовищ та води. Однак у роботі з цим компонентом слід враховувати здатність отриманої бетонної суміші до надмірної текучості.

Висновки

Наразі сфера будівельного виробництва змінюється досить динамічно. Ще зовсім недавно не було матеріалів, які б дозволяли досягти таких якісно інших результатів. Тому є сенс у проведенні досліджень, про які йдеться у цій статті. Навіть якщо мати

достатньо знань про компоненти, які використовує те чи інше виробництво, трапляються ситуації, коли погодні умови можуть кардинально змінити результат будівельних робіт, однак не завжди у більш вигідний як для забудовника, так і для кінцевого споживача бік.

Важливо враховувати не тільки інформацію про взаємодію багатьох факторів, а й необхідність зведення цивільної будівлі, яка задовольняє тепло-технічні характеристики сучасного будівництва. Від цього залежить не тільки прибуток від запланованого проекту, а й умови проживання та комфорт багатьох поколінь населення нашої країни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрухов В. М., Матвійчук В. В., Мартинова Л. В., Отаманова М. Б. BIM технології проектування – перспектива розвитку будівельної галузі. *Бетон и железобетон в Украине*. 2011. № 5. С. 2–6.
2. Назаренко О. М., Бейнер Н. В., Бейнер П. С. Комплексний підхід до проектування енергоефективних будівель на основі BIM. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1 (013). С. 66–73.
3. ДБН В.2.6.-33:2018. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування. Київ : Мінрегіон України, 2018, 19 с.
4. Шишкіна О. О. Бетони високої міцності для композитних матеріалів. *Вісник Криворізького національного університету*. 2022. Вип. 54. С. 42–46.
5. Пристинська В. В. Ефективність використання хімічних добавок для виготовлення залізобетонних виробів. Наука та прогрес транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2013. Вип. 1 (43). С. 170–175.
6. Маруха В. І. Підвищення роботоздатності пошкоджених бетонних і залізобетонних конструкцій ущільнювально-зміцнювальними інекціями. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2013. № 1. С. 7–17.
7. Матченко П. Т. Перевірка міцності та тріщиностійкості закладних деталей існуючих залізобетонних конструкцій. *Будівництво України*. 2019. № 3. С. 9–15.
8. Панасюк В. В., Маруха В. І., Силованюк В. П. Ефективні ін'єкційні матеріали та технології відновлення роботоздатності пошкоджених будівельних споруд тривалої експлуатації. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. № 2. С. 22–29.
9. Черкес Б. С., Петришин Г. П., Коник С. І. Інтенсифікація забудови історично сформованого міста (на прикладі Львова). *Національний університет «Львівська політехніка»*. 2018. № 893. С. 129–138.

REFERENCES

1. Andrukhov V.M., Matviychuk V.V., Martynova L.V. and Otamanova M.B. *BIM technologies in design – a perspective for the development of the construction industry*. *Beton y zhelezobeton v Ukraine* [Concrete and Reinforced Concrete in Ukraine]. 2011, no. 5, pp. 2–6. (in Ukrainian).
2. Nazarenko O.M., Beiner N.V. and Beiner P.S. *Comprehensive approach to the design of energy-efficient buildings based on BIM-technology*. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 1 (013), pp. 66–73. (in Ukrainian).
3. *DBN V.2.6.-33:2018. Konstruktivni zovnishnikh stin iz fasadnoyu teploizolyatsiyeyu. Vymohy do proektuvannya* [DBN V.2.6.-33:2018. Designs of external walls with facade thermal insulation. Design requirements]. Kyiv : Ministry of Regions of Ukraine, 2018, 19 p. (in Ukrainian).

4. Shishkina O.O. *Betony vysokoyi mitsnosti dlya kompozytnykh materialiv* [High strength concretes for composite materials]. *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu* [Bulletin of Kryvyi Rih National University]. 2022, iss. 54, pp. 42–46. (in Ukrainian).

5. Prystynska V.V. *Efektivnist' vykorystannya khimichnykh dobavok dlya vyhotovlennya zalizobetonnykh vyrobiv. Nauka ta prohres transportu* [The effectiveness of using chemical additives for the production of reinforced concrete products. Science and progress of transport]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport]. 2013, iss. 1 (43), pp. 170–175. (in Ukrainian).

6. Marukha V.I. *Pidvyshchennya robotozdatnosti poshkodzhenykh betonnykh i zalizobetonnykh konstruksiy ushchil'nyuval'no-zmitsnyuval'nymy inyektsiyamy* [Increasing the performance of damaged concrete and reinforced concrete structures by sealing and strengthening injections]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv* [Physico-Chemical Mechanics of Materials]. 2013, no. 1, pp. 7–17. (in Ukrainian).

7. Matchenko P.T. *Perevirka mitsnosti ta trishchynostiystykosti zakladnykh detaley isnuuyuchykh zalizobetonnykh konstruksiy* [Checking the strength and crack resistance of embedded parts of existing reinforced concrete structures]. *Budivnytstvo Ukrayiny* [Construction of Ukraine], 2019, no. 3, pp. 9–15. (in Ukrainian).

8. Panasiuk V.V., Marukha V.I. and Silovaniuk V.P. *Efektivni in'yektsiyini materialy ta tekhnolohiyi vidnovlennya robotozdatnosti poshkodzhenykh budivel'nykh sporud tryvaloyi ekspluatatsiyi* [Effective injection materials and technologies for restoring the performance of damaged construction structures of long-term use]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv* [Physico-Chemical Mechanics of Materials]. 2018, no. 2, pp. 22–29. (in Ukrainian).

9. Cherkes B.S., Petryshyn H.P. and Konyk S.I. *Intensyfikatsiya zabudovy istorychno sformovanoho mista (na prykladi L'vova)* [Intensification of development of a historically formed city (on the example of Lviv)]. *Natsional'nyy universytet "L'vivs'ka politekhnika"* [Lviv Polytechnic National University]. 2018, no. 893, pp. 129–138. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 04.03.2024.

УДК 69:004.925.84

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.41.1041

АНАЛІЗ ФАЙЛІВ У ФОРМАТІ STL ЯК ОСНОВА МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

ГУСЄВ В. О.^{1*}, *асп.*,

НИКІФОРОВА Т. Д.², *докт. техн. наук, проф.*

^{1*} Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (093) 017-80-81, e-mail: husievvitalii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6813-9824

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (050) 363-46-38, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

Анотація. Постановка проблеми. Інтеграція передових технологій у сфері програмного забезпечення на етапах будівництва стає одним із ключових завдань проєктувальників. Створення об'єктів за допомогою 3D-друку потребує застосування відповідних високотехнологічних рішень. Одне з таких рішень полягає в аналізі процесу перетворення об'ємних моделей на керуючий код для 3D-принтерів, зокрема, аналізу файлів у форматі STL. Від цього аналізу, в першу чергу, залежить ефективність виготовлення будівельних конструкцій і споруд методом 3D-друку. **Мета статті.** Дослідження націлене на глибокий аналіз файлів у форматі STL у світлі росту адитивного виробництва та прогресу цифрових технологій у будівельній сфері. Мета роботи – надання всебічного огляду основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, що включає методи обчислення площі та об'єму сітки STL. Виявлення та аналіз типових помилок, які можуть виникати при роботі з файлами цього формату та визначення ключових критеріїв для оцінення геометричної якості сітки. Розгляд стратегій та альтернативних підходів для подолання можливих недоліків, що можуть виникнути при використанні формату STL. Створення комплексного уявлення про цей формат і надання відповідних рекомендацій для подальшого вдосконалення процесів роботи з ним. **Висновок.** Дослідження файлів у форматі STL відіграє важливу роль у розвитку адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Воно має на меті детальний огляд основної інформації, що стосується використання цього формату, включаючи методи розрахунку площі та об'єму сітки STL, які є ключовими для ефективного моделювання та виробництва конструкцій. Під час дослідження виявлено низку помилок та визначено ключові критерії для оцінення геометричної якості сітки. Це включає правильне орієнтування нормалей, виявлення та виправлення перекриття, перетинів та ізольованих граней. Для подальших досліджень пропонується розглянути альтернативні варіанти подолання деяких недоліків формату STL. Наприклад, можна розглянути автоматизовані методи виявлення та виправлення помилок у мережі, розробку нових форматів файлів із більшою функціональністю та підтримкою додаткових властивостей моделей. Дослідження таких альтернатив може сприяти поліпшенню ефективності та точності використання файлів у будівництві та адитивному виробництві.

Ключові слова: 3D-друк; STL-файли; САПР; 3D-моделювання; формат ASCII; метод поширеного напівнаплення

ANALYSIS OF FILES IN STL FORMAT AS THE BASIS OF MODELING FOR 3D PRINTING OF BUILDING OBJECTS

HUSIEV V.O.^{1*}, *Postgraduate Student*,

NIKIFOROVA T.D.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (093) 017-80-81, e-mail: husievvitalii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6813-9824

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 363-46-38, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

Abstract. Problem statement. The integration of advanced technologies in the field of software at the stages of construction becomes one of the key tasks of designers. Creating objects using 3D printing requires the use of

appropriate high-tech solutions. One of these solutions consists in the analysis of the process of converting three-dimensional models into a control code for 3D printers, in particular, the analysis of files in STL format. The efficiency of manufacturing construction structures and structures by 3D printing depends primarily on this analysis. **Purpose of the article.** This study aims at an in-depth analysis of STL files in light of the growth of additive manufacturing and the advancement of digital technologies in the construction industry. The purpose of the work is to provide a comprehensive overview of the basic information related to the use of this format, including methods for calculating the area and volume of the STL grid. Identification and analysis of typical errors that may occur when working with files of this format and definition of key criteria for evaluating the geometric quality of the grid. Consideration of strategies and alternative approaches to overcome possible drawbacks that may arise when using the STL format. Creation of a comprehensive view of this format and provision of appropriate recommendations for further improvement of the processes of working with it. **Conclusion.** The study of STL files plays an important role in the development of additive manufacturing and digital technologies in the construction industry. This study aims to provide a detailed overview of the basic information related to the use of this format, including methods for calculating the area and volume of an STL mesh, which are crucial for efficient modeling and production of structures. During the research, a number of errors were identified and key criteria for assessing the geometric quality of the grid were determined. This includes correctly orienting normals, detecting and correcting overlaps, intersections, and isolated faces. For further research, it is proposed to consider alternative options for overcoming some of the shortcomings of the STL format. For example, you can consider automated methods of detecting and correcting errors in the network, developing new file formats with greater functionality and support for additional model properties. Investigating such alternatives can help improve the efficiency and accuracy of file use in construction and additive manufacturing.

Keywords: *Building objects; 3D printing; STL files; CAD; 3D modeling; ASCII format; fused deposition modeling*

Постановка проблеми. У сучасному адитивному виробництві, такому як 3D-друк, формати файлів відіграють ключову роль у передачі інформації про об'єкт від програмного забезпечення до 3D-принтера. Один із найбільш поширених форматів для передачі геометричних даних об'єктів в адитивному виробництві – формат STL (Stereolithography or Standard Tessellation Language).

Незважаючи на значне поширення, формат STL має свої обмеження та недоліки. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень в області геометричних форматів у адитивному виробництві, особливо в контексті формату STL.

Основні проблеми, які потрібно розглянути та дослідити.

Точність та деталізація. Оцінка можливостей формату STL у передачі геометричної точності та деталізації об'єктів, особливо під час роботи зі складними або великими моделями.

Ефективність зберігання та передачі даних. Аналіз ефективності використання формату STL в контексті обсягу даних, необхідного для опису об'єктів, та можливих методів стиснення даних без втрати якості друку. Підтримка геометричних

особливостей. Дослідження можливостей формату STL обробляти складні геометричні об'єкти, такі як криволінійні поверхні, порожнини та внутрішні порожнини.

Стійкість до помилок та виправлення дефектів. Аналіз методів виявлення та виправлення помилок у файлах формату STL, таких як некоректні трикутники, самоперетини тощо.

Сумісність та переносимість. Дослідження сумісності формату STL з різними програмними та апаратними платформами, а також можливих обмежень при переміщенні файлів між різними системами.

Мета дослідження полягає в підвищенні якості та ефективності адитивного виробництва шляхом більш повного розуміння обмежень та можливостей формату STL та пропозиції відповідних поліпшень або альтернативних рішень.

Мета статті полягає в дослідженні файлів у форматі STL у зв'язку з розвитком адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Надання вичерпного опису основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, включаючи методи обчислення площі та об'єму сітки STL. Окреслення типових

помилки та ключових критеріїв для оцінки геометричної якості сітки. Надання альтернативних варіантів подолання деяких недоліків формату STL.

Результати досліджень. Файли у форматі STL, створені системами 3D-моделювання, включають трикутне представлення поверхонь і стали стандартом для введення даних у технологіях швидкого прототипування. У цих технологіях фізичні об'єкти будуються шар за шаром, де кожен шар є двовимірним перерізом тривимірної сітки у форматі STL.

У сучасних системах комп'ютерно-автоматизованого проектування (САПР) мозаїка поверхонь часто містить помилки в структурі даних у вигляді прогалів і дірок, що спричинює відкриті петлі у поперечних перерізах, які неможливо виготовити як шари.

Проте таке представлення у вигляді трикутних сіток, викликає дві основні проблеми. Одна полягає в тому, що багато сучасних твердотільних моделей не генерують топологічно правильних мозаїк. Помилки, такі як прогалів та численні грані, зумовлюють неправильні поперечні перерізи, які не можуть бути виготовлені як шари.

Протягом останнього десятиліття багато дослідницьких груп працювали над спрощенням поверхонь та опублікували багато праць із цієї теми. Алгоритми спрощення сітки зменшують кількість трикутників у даній моделі, мінімально змінюючи її геометричну форму.

Інша проблема полягає у високій складності таких сіток. Моделі з мільйонами трикутників часто вимагають більше, ніж доступне сховище та тривалий час обробки. Тому зменшення складності поверхневих сіток становить обов'язкову вимогу для роботи з такими представленнями моделей.

Під час теселяції в сітці дискретизації можуть виникнути численні проблеми з викривленням форми. Тому розроблення дискретних алгоритмів для трикутних сіток з метою згладжування форми стало ще однією центральною проблемою.

Такі алгоритми використовують результати та методи диференціальної геометрії, варіаційного дизайну поверхні та числового аналізу та знаходять застосування в багатьох галузях. Проте дуже мало робіт стосуються виявлення та виправлення топологічних помилок і побудови відповідних структур даних над трикутною сіткою, які також містять топологічну інформацію.

Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій вказує на потребу дослідження таких аспектів загальної проблеми: стандартизація та оптимізація процесів перетворення даних та автоматизація аналізу та оптимізація геометричної якості.

Розширення файла STL реалізоване в більшості програмного забезпечення САПР і використовується в різних галузях для моделювання геометричної інформації деталей або форм. Проте використання файла STL передбачає розуміння його вмісту, методів утворення сітки та правил генерації файлів, а також можливих кодувань даних [1].

Експлуатація такого типу геометричної моделі проста. Файл STL містить поверхневі дані САПР, які дискретно описують геометрію поверхні об'єкта у тривимірному просторі. Поверхня, яка визначена у тривимірному просторі, апроксимується набором трикутників, також відомих як грані. Інші геометричні елементи можуть бути використані для дискретизації поверхні (рис. 1); проте лише дискретизація поверхні за допомогою трикутників дозволяє отримати файл у форматі STL.

На практиці кожна грань (або «facet» англійською) визначається координатами своїх трьох вершин у декартовій системі.

Кожна грань має атрибут напрямку матеріалу, визначений за допомогою орієнтації одиничної нормалі до грані (або «normal» англійською).

Нормаль спрямована зовні від матеріалу (рис. 2).

Наразі, крім втрати інформації, що відбувається через відсутність відповідних метаданих у файлі STL, виникає значний

розріз у цифровому процесі додавання матеріалу. Фактично, модель, створена у CAD 3D, перетворюється на набір трикутних граней (у форматі STL) [2].

Потім, з використанням цього файла, програмне забезпечення САМ автоматично

розбиває об'єкт на тонкі горизонтальні шари, які виготовляються на апаратах для адитивного виробництва (див. рис. 3). Процес перетворення вихідної моделі з CAD на файл STL, необхідний для САМ, спричинює цифровий розрив.



Рис. 1. Візуалізація файлів із дискретними поверхнями

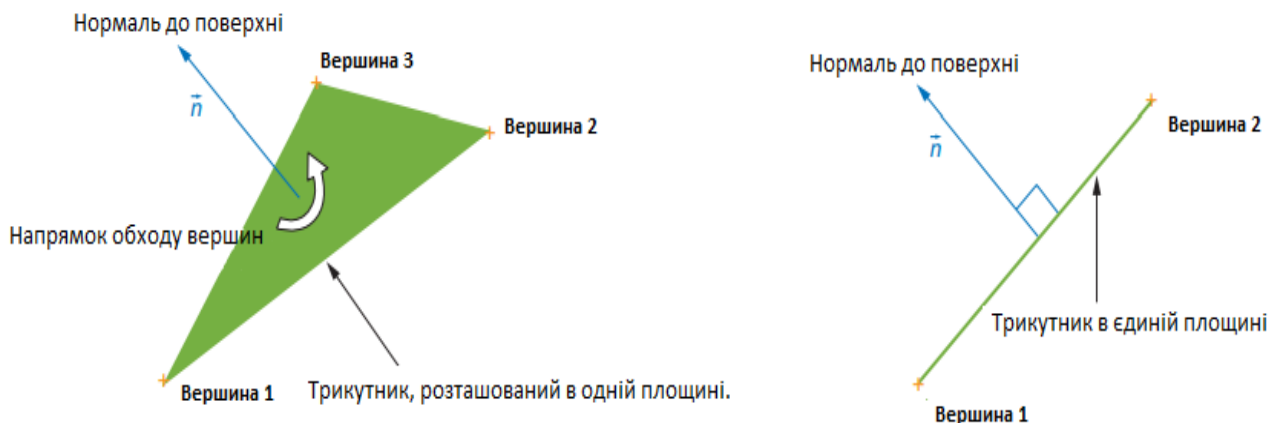


Рис. 2. Схематизація трикутника у форматі STL з указаними вершинами та відповідною нормаллю



Рис. 3. Ілюстрація порушення цифрового ланцюга

Сітку STL формують за допомогою теселяції, що означає розміщення геометричних елементів у формі трикутників на всій поверхні тривимірної моделі таким чином, щоб утворилися безперервні елементи без перекриттів чи

проміжків [3; 4]. Найбільш поширений метод для досягнення цього – використання алгоритму Делонея. Цей підхід дозволяє створювати складні тривимірні об'єкти, збираючи прості геометричні форми, такі як трикутники.

Під час створення файла STL слід дотримуватися кількох правил. Кожен трикутник у файлі STL має спільні дві

вершини із кожним з трикутників (рис. 4). Виходячи з цього правила, правильний файл STL повинен мати парну кількість граней.



Рис. 4. Графічне зображення правила вершин

Правило сортування трикутників рекомендує упорядковувати вершини за зростанням значень координат по осі z для полегшення обробки файла деякими програмами [1]. Однак це правило не завжди строго виконується.

Існує два типи кодування файлів у форматі STL: ASCII (рис. 5) і бінарний (рис. 6). Обидва типи містять однакову інформацію, відмінність полягає лише в організації та зберіганні даних у комп'ютері. Формат STL у вигляді ASCII є текстовим кодуванням і може бути переглянутий за допомогою будь-якого текстового редактора. Формат STL у вигляді бінарного коду не може бути прочитаний звичайним

текстовим редактором, проте він створює файли меншого розміру.

Особливість формату STL полягає в тому, що він безрозмірний. У файлі STL відсутня інформація про масштаб чи довжину. Це означає, що у файлі немає внутрішнього опису одиниць вимірювання, використаних для створення тривимірної моделі. Тому одиниці, що відповідають за розміри, обирає користувач при відкритті або читанні файла (наприклад, мікрометри, міліметри, дюйми, сантиметри і т. д.). Після цього можна обчислити площу граней, які утворюють сітку, а також об'єм, включений всередині сітки [5; 6].

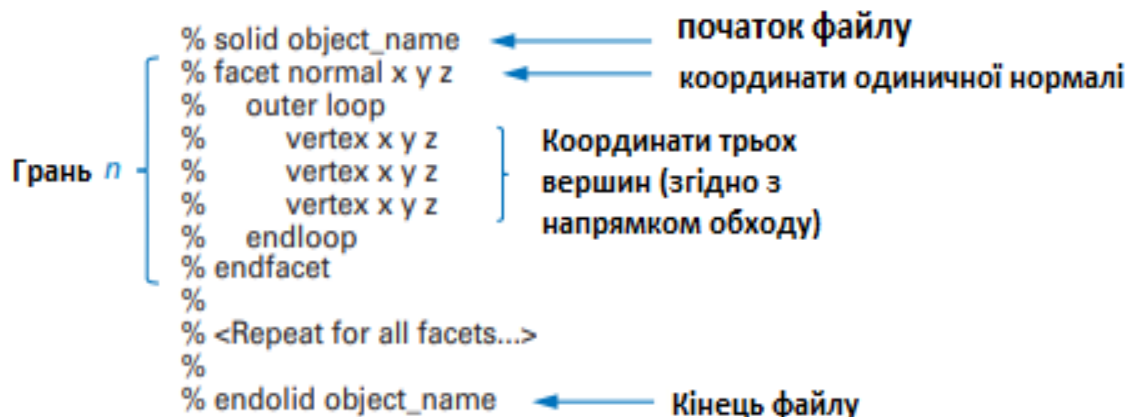


Рис. 5. Структура файла у форматі ASCII STL

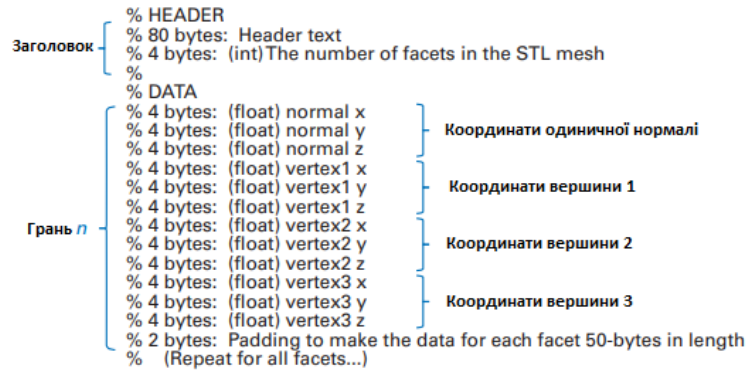


Рис. 6. Структура бінарного файла STL

Розрахунок площі геометрії у форматі STL досить простий. Формула Герона дозволяє обчислити площу трикутника A_i трикутника i у просторі, знаючи довжини трьох сторін l_k i , отже, також півпериметр p_i . Загальна площа поверхні мережі є сумою всіх площових одиниць A_i кожної грані i .

Довжина ребра l_k між двома точками $A(x_A, y_A, z_A)$ і $B(x_B, y_B, z_B)$ отримується з рівняння:

$$l_k = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}, \quad (1)$$

де $k = 1, 2, 3$.

Півпериметр p_i елементарного трикутника i (грані) задається рівнянням:

$$p_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 l_k. \quad (2)$$

Формула Герона дозволяє визначити площу A_i елементарного трикутника i (грані):

$$A_i = \sqrt{p_i(p_i - l_1)(p_i - l_2)(p_i - l_3)}. \quad (3)$$

Загальна площа сітки:

$$\text{Загальна площа} = \sum A_i. \quad (4)$$

Розрахунок об'єму сітки може бути корисним для оцінення обсягу матеріалу, необхідного для виготовлення виробу. Однак обчислення об'єму, включеного всередині сітки STL, – складна задача. Найбільш ефективний метод полягає в обчисленні об'єму кожного тетраедра, який має чотири вершини, при цьому основою є елементарний трикутник i (грань, що складається з трьох точок: А, В, С), а вершиною є точка початку координат (О) (рис. 7).

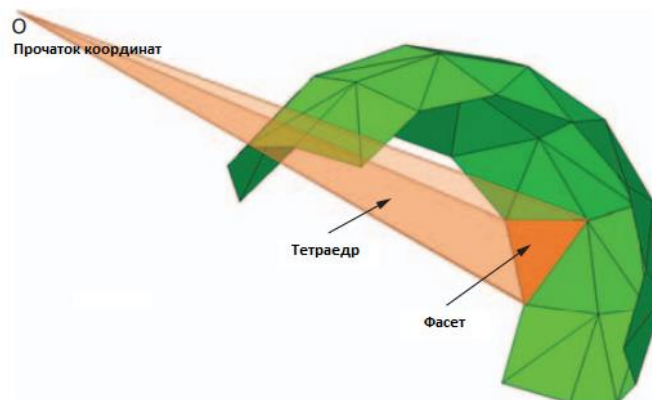


Рис. 7. Графічне зображення створення тетраедра на частині сферичної мережі

Дискретизація поверхні може стати причиною виникнення дефектів, які, у свою чергу, часто викликають проблеми у подальшому виготовленні деталей. Навіть за відсутності дефектів якість дискретизованої поверхні може бути оцінена за допомогою геометричних критеріїв якості.

Після автоматичного створення сітки, на жаль, можуть виникати деякі загальні дефекти на отриманій дискретизованій геометрії.

Вектор нормалі до грані повинен вказувати на зовнішній бік матеріалу, щоб

дозволити розрізняти зовнішню та внутрішню частини об'єму. У деяких випадках можливо, що деякі грані отримують нормалі, спрямовані у протилежний бік. Для таких граней вказівка напрямку матеріалу буде невірною. Наприклад, у випадку червоного трикутника (рис. 8) нормаль спрямована всередину, а не назовні. Така грань має обернену нормаль. Можливо, що геометрія, утворена гранями, має пропуски або отвори на поверхні (рис. 9).

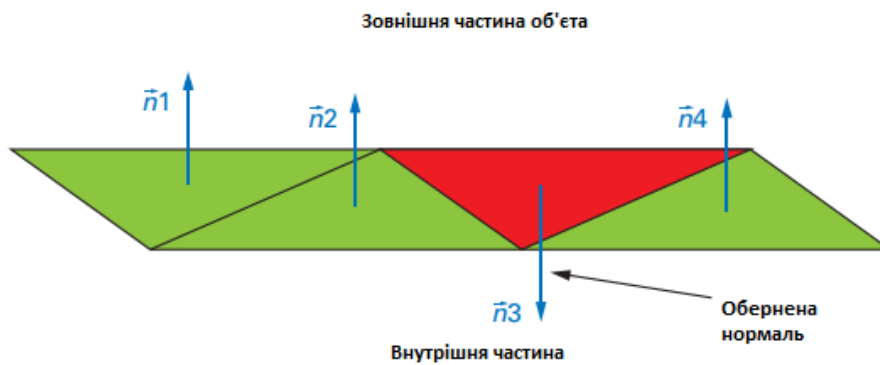


Рис. 8. Нормаль до оберненої грані

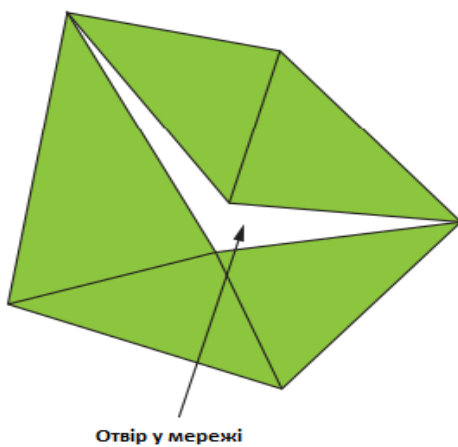


Рис. 9. Незакрита сітка STL

Поверхня, яка була дискретизована, складається з прилеглих граней, де дві сусідні грані мають спільне ребро. Проте існує можливість, що одна грань може перекривати іншу замість того, щоб бути прилегою до неї (рис.10). У такому випадку перекривальна грань не повністю відповідає правилу розміщення вершин.

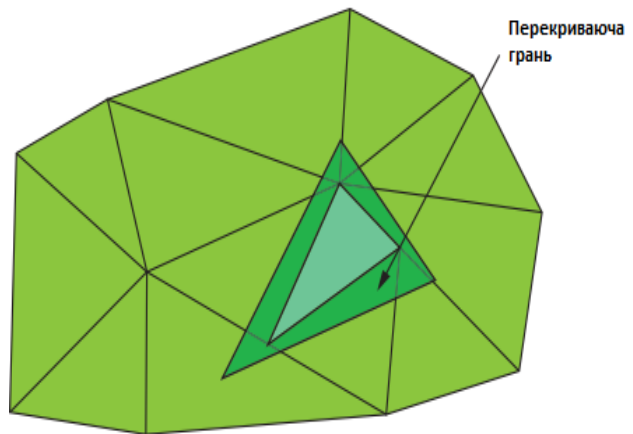


Рис. 10. Випадок перекривальної грані

У певних випадках створення сітки може спричинити появу граней, які перетинаються (рис. 11), що порушує правило розміщення вершин.

У геометрії, яка була дискретизована, можуть існувати окремі грані, частково або повністю відокремлені від решти геометрії (рис. 12). У такому випадку правило

розміщення вершин не дотримується повністю.

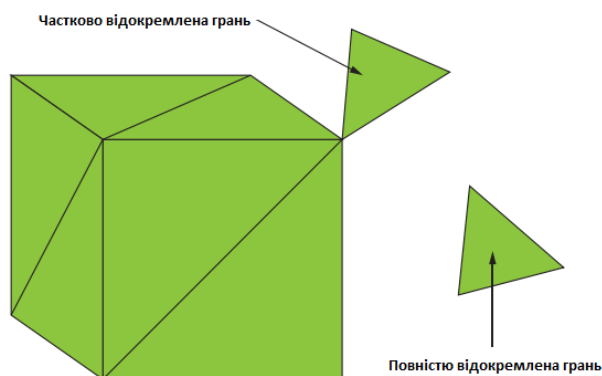


Рис. 11. Випадок із гранями, які перетинаються

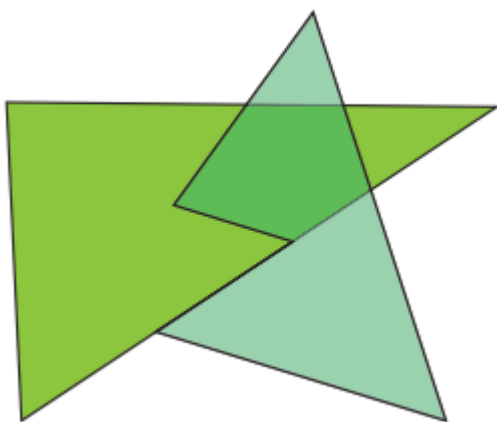


Рис. 12. Випадок з окремими гранями

У програмах комп'ютерно-допоміжного проєктування (САПР) всі ці недоліки зазвичай називаються «неманіфольною геометрією». Щоб виправити ці проблеми максимально ефективно, сучасні програми САПР мають у своєму арсеналі різноманітні інструменти. Наприклад, є інструмент, який дозволяє обертати нормалі граней так, щоб вони коректно вказували на зовнішній бік матеріалу [7; 8].

Також існують інструменти для видалення окремих трикутників або груп трикутників. Ці засоби можуть бути використані для вирішення проблем із перекриттям, перетинами та ізольованими гранями [9; 10].

Також можна вручну створювати додаткові трикутники, наприклад, для заповнення отворів у сітці. Цей ручний підхід придатний для дуже малих отворів. Однак для великих отворів розроблено

багато автоматичних алгоритмів «заповнення отворів».

Серед викликів цих алгоритмів можна відмітити кривизну сусідніх поверхонь та оптимальне відтворення геометрії сусідніх трикутників.

Нарешті, були розроблені інструменти для автоматичного очищення мережі від ізольованих, дубльованих або граней із некоректною орієнтацією.

Висновки та перспектива подальших досліджень

Дослідження файлів у форматі STL має велике значення в контексті розвитку адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Надання вичерпного опису основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, включає методи обчислення площі та об'єму сітки STL, що важливо для ефективного моделювання та виробництва деталей.

Під час дослідження виявлено низку помилок та ключових критеріїв для оцінки геометричної якості сітки. Це включає в себе такі аспекти, як правильне орієнтування нормалей, виявлення та виправлення перекриття, перетинів та ізольованих граней.

Для подальших досліджень пропонується розглянути альтернативні варіанти подолання деяких недоліків формату STL, таких як автоматизоване виявлення та виправлення помилок у сітці, розроблення нових форматів файлів із більшою функціональністю та підтримкою додаткових властивостей моделей. Дослідження таких альтернатив може сприяти поліпшенню ефективності та точності використання файлів для 3D-друку будівельних об'єктів та в адитивному виробництві.

Використання більш продуктивних форматів файлів: замість STL можна використовувати більш продуктивні формати, такі як OBJ, PLY або 3MF. Ці формати можуть підтримувати більш широкий спектр функцій, таких як текстури, колірні дані, нормалі та інші.

Використання більш точних форматів: деякі формати, такі як STEP або IGES,

забезпечують більш точне зображення геометрії, що може бути корисним для інженерних застосувань та точних обчислень.

Компресія даних: для зменшення обсягу даних та поліпшення швидкості обробки можна застосовувати методи компресії даних для формату STL або використовувати інші формати з вбудованою підтримкою компресії.

Використання додаткових метаданих: додавання додаткових метаданих до файлів, таких як назви, описи, автори тощо, може

поліпшити організацію та розуміння моделей.

Стандартизація: встановлення стандартів для створення та обміну файлами тривимірних моделей може поліпшити сумісність та спростити роботу з ними між різними програмами та системами.

Ці альтернативні варіанти можуть допомогти усунути деякі недоліки формату STL та поліпшити процес роботи з тривимірними моделями, забезпечуючи кращу якість та продуктивність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3D printer g-code commands : full list & tutorial. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/> (дата звернення : 07.07.2022).
2. Гусев В., Нікіфорова Т. Дослідження етапів перетворення об'ємної моделі виробу на керуючий код для 3d-принтера в контексті автоматизованого будівництва технології 3d-друку. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 4. С. 38–45. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.38.876%20>
3. Nayyeri P., Zareinia K., Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119, № 5-6. Pp. 2785–2810.
4. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia engineering*. 2016. Vol. 151. Pp. 292–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357> (дата звернення : 07.07.2022).
5. Гусев В., Нікіфорова Т. Аналіз файлів формату stl як вхідних даних для систем швидкого прототипування. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2022. № 11. С. 77–85. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85>
6. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in Construction*. 2004. Vol. 13, № 1. Pp. 5–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012> (дата звернення : 07.07.2022).
7. STL repair (online & offline) : the best software of 2021. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/stl-repair-fixer-tool-online-offline/> (дата звернення : 07.07.2022).
8. STL (stereolithography) file format family. Home Library of Congress. URL: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml#useful> (дата звернення : 07.07.2022).
9. Szilvsi-Nagy M., Mátyási G. Analysis of STL files. *Mathematical and computer modelling*. 2003. Vol. 38, № 7–9. С. 945–960. URL: [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(03)90079-3) (дата звернення : 07.07.2022).
10. Гусев В. О., Нікіфорова Т. Д. Технологія 3D-друку у будівництві. Концептуальна схема перетворення 3d-моделі виробу в керуючий код для 3D-принтеру. *Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022) : зб. наук. пр. за матер. XIV Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Полтава, 20–22 липня 2022 р.)*. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка», 2022. С. 59–61.

REFERENCES

1. 3D printer g-code commands : full list & tutorial. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/> (date of access : 07.07.2022).
2. Husiev V.O. and Nikiforova T.D. *Doslidzhennya etapiv peretvorenniya ob'yemnoyi modeli vyrobu na keruyuchy kod dlya 3d-pryntera v konteksti avtomatyzovanoho budivnytstva tekhnolohiyi 3d-druku* [Study of the stages of conversion of a three-dimensional model of a product into a control code for a 3d printer in the context of automated construction of 3d printing technology]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 4, pp. 38–45. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.38.876%20> (in Ukrainain).
3. Nayyeri P., Zareinia K. and Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology : a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, vol. 119, no. 5–6, pp. 2785–2810.

4. Hager I., Golonka A. and Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016, vol. 151, pp. 292–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357> (date of access : 07.07.2022).
5. Husiev V.O. and Nikiforova T.D. *Analiz fayliv formatu stl yak vkhidnykh danykh dlya system shvydkoho prototypuvannya* [Analysis of stl format files as input data for rapid prototyping systems]. *Budivel'ni konstruktsiyi. Teoriya i praktyka* [Building structures. Theory and practice]. 2022, no. 11, pp. 77–85. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85> (in Ukrainian).
6. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting–related robotics and information technologies. *Automation in Construction*. 2004, vol. 13, no. 1, pp. 5–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012> (date of access : 07.07.2022).
7. STL repair (online & offline) : the best software of 2021. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/stl-repair-fixer-tool-online-offline/> (date of access : 07.07.2022).
8. STL (stereolithography) file format family. Home Library of Congress. URL: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml#useful> (date of access : 07.07.2022).
9. Szilvsi-Nagy M. and Mátyási G. Analysis of STL files. *Mathematical and computer modelling*. 2003, vol. 38, no. 7–9, pp. 945–960. URL: [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(03)90079-3) (date of access : 07.07.2022).
10. Husiev V.O. and Nikiforova T.D. *Tekhnolohiya 3D-druku u budivnytstvi. Kontseptual'na skhema peretvorenniya 3d-modeli vyrobu v keruyuchy kod dlya 3D-prynteru. Kompleksni kompozytni konstruktsiyi budivel' ta sporud v umovakh voyennoho stanu (CSCS-2022)* [3D printing technology in construction. Conceptual diagram of the transformation of a 3D product model into a control code for a 3d printer. Complex composite structures of buildings and structures under martial law (CSCS-2022)]. *Zb. nauk. pr. za materialamy XIV Mizhnar. naukovu-tekhn. konf., m. Poltava, 20–22 lypnia 2022 r.* [Collection. of Science Works based on the Materials of the XIV International Scientific and Technical Conf., Poltava, July 20–22, 2022]. Poltava : National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2022, pp. 59–61. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.02.2024.

УДК 621.869

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.51.1042

КОНСТРУКЦІЇ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ КОВШІВ СКРЕПЕРІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ЗАПОВНЕННЯ

КРОЛЬ Р. М.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
СПІЛЬНИК М. А.², канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра будівельних і дорожніх машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-33-66, e-mail: krol.roman2012@gmail.ua, ORCID ID: 0000-0002-7180-663X

² Кафедра будівельних і дорожніх машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-33-66, e-mail: spilnyk.mykhailo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6990-1382

Анотація. Постановка проблеми. Повне заповнення ковша скрепера «з шапкою» за рахунок тягового зусилля базового тягача складне і потребує значних тягових зусиль, котрі базовий тягач не в змозі розвинути, тому застосовують трактори-штовхачі або зчеплення скреперів у скреперний потяг і роботу за схемою «тягни-штовхай». Окремим напрямком розвиваються конструкції скреперів із примусовим завантаженням за рахунок різноманітних інтенсифікаторів – елеваторне завантаження, кидачі, гвинтові завантажувачі тощо, але суттєвим недоліком, окрім більшої маси скрепера та необхідності відбору частини крутного моменту від вала двигуна на привід інтенсифікатора, стала необхідність усунення інтенсифікатора з порожнини ковша під час розвантаження ґрунту. **Мета статті** – розроблення ковшів скреперів телескопічного типу збільшеної місткості, що дозволить виконувати заповнення ковша скрепера «з шапкою» лише за рахунок тягового зусилля базового тягача без використання трактора-штовхача. Запропонована технологія заповнення ковша здійснюється в три стадії. На першій стадії відбувається заповнення ґрунтом місткості передньої заслінки; на другій – відведення задньої стінки в крайнє положення телескопічної секції та заповнення ґрунтом простору, що утворився; на третій – відведення телескопічної секції з ґрунтом та задньої стінки у максимальнє крайнє положення та заповнення ґрунтом простору, що утворився. **Висновок.** Запропоновано конструкції ковшів скрепера телескопічного типу збільшеної місткості та технології їх заповнення, що дозволяє виконувати заповнення ковша за рахунок тягового зусилля тягача, а збільшений об'єм – підвищити продуктивність скрепера в цілому.

Ключові слова: тягове зусилля; скрепер; телескопічний ківш; технологія заповнення; передня заслінка; телескопічна секція; порожнина ковша; маятникова задня стінка

CONSTRUCTIONS OF TELESCOPIC SCRAPER BUCKETS AND THEIR FILLING TECHNOLOGY

KROL R.M.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
SPILNYK M.A.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Department of Building and Travelling of Machines, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (099) 207-87-00, e-mail: krol.roman2012@gmail.ua, ORCID ID: 0000-0002-7180-663X

² Department of Building and Travelling of machines (BTM), Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-33-66, e-mail: spilnyk.mykhailo@pdaba.edu.ua ORCID ID: 0000-0001-6990-1382

Abstract. Problem statement. The complete filling of the bucket of the scraper “with a cap” due to the traction force of the base tractor is complicated and requires significant traction forces, which the base tractor is not able to develop, therefore pusher tractors or the coupling of scrapers to the scraper train and work according to the “pull-push” scheme used. In a separate direction, designs of scrapers with forced loading due to various intensifiers are developing – elevator loading, throwers, screw loaders, etc., but a significant drawback, in addition to the greater mass of the scraper and the need to select part of the torque from the engine shaft to drive the intensifier, is the need to eliminate of the intensifier from the bucket cavity when unloading the soil. **Purpose of the article** is to develop telescopic scraper buckets of increased capacity, which will allow filling of the scraper bucket “with a cap” only due to the traction force

of the basic tractor without the use of a pusher tractor. The proposed bucket filling technology is carried out in three stages. At the first stage, the capacity of the front flap is filled with soil; on the second – removal of the rear wall to the extreme position of the telescopic section and filling the resulting space with soil; removal of the telescopic section with soil and the back wall to the maximum extreme position and filling the space formed with soil – on the third **Conclusion.** It is proposed the designs of telescopic type scraper buckets with increased capacity and their filling technology, which allows you to fill the bucket due to the traction force of the tractor, and the increased volume allows to increase the productivity of the scraper as a whole.

Keywords: *traction force; scraper; telescopic bucket; filling technology; front flap; telescopic section; bucket cavity; pendulum rear wall*

Постановка проблеми. Повне заповнення ковша скрепера «з шапкою» за рахунок тягового зусилля базового тягача складне і потребує значних тягових зусиль, котрі базовий тягач не в змозі розвинути, тому застосовують трактори-штовхачі або зчеплення скреперів у скреперний потяг і роботу за схемою «тягни-штовхай». Окремим напрямком розвиваються конструкції скреперів із примусовим завантаженням за рахунок різноманітних інтенсифікаторів – елеваторне завантаження, кидачі, гвинтові завантажувачі тощо, але суттєвим недоліком, окрім більшої маси скрепера та необхідності відбору частини крутного моменту від вала двигуна на привід інтенсифікатора, є необхідність усунення інтенсифікатора з порожнини ковша під час розвантаження ґрунту.

Аналіз публікацій. Підвищення продуктивності скрепера можливе шляхом збільшення геометричної місткості ковша – місткості передньої заслінки, довжини самого ковша, за рахунок довжини телескопічної секції. Проте вищезгадані заходи викликають незначне зниження опору наповненню і збільшенню набраного у ківш ґрунту тільки для піщаних малозв'язних ґрунтів. Це пояснюється незмінністю характеру проникнення ґрунтової стружки у ківш.

Так, для ковша скрепера телескопічного типу з глибокою передньою заслінкою і збільшеною довжиною днища за рахунок телескопічної секції при завантаженні тяговим зусиллям, картина заповнення (фізична суть процесу) залишається колишньою. На завершальній або близькій до неї стадії пласт ґрунту піднімається на певну висоту й обсипається під кутом

внутрішнього тертя [1; 2]. При цьому у зонах передньої заслінки і задньої стінки спостерігаються порожнечі, заповнення яких пов'язане з великими енергетичними витратами, зумовленими необхідністю проштовхування стовпа ґрунту в ковші на висоту, більшу за розрахункову для цієї машини.

Мета статті – опис розроблення ковшів скреперів телескопічного типу збільшеної місткості, що дозволить виконувати заповнення ковша скрепера «з шапкою» лише за рахунок тягового зусилля базового тягача без використання трактора-штовхача.

Виклад матеріалу

З метою самостійного заповнення ковша скрепера за рахунок тягового зусилля базового трактора запропоновано конструкцію ковша скрепера телескопічного типу з напівкруглим днищем й маятниковою задньою стінкою та двостадійну технологію його наповнення.

Робоче обладнання скрепера (рис. 1) складається з ковша 1 із напівкруглим днищем, шарнірно з'єданого з тяговою рамою 2, передньої заслінки 3, задньої стінки 4 маятникового типу, телескопічної секції 5 ковша. Телескопічна секція 5 переміщується у внутрішній порожнині ковша 1 за допомогою гідроциліндрів 6 керування по напрямним та має ребордні колеса 7 й бокові опорні ролики 8. Маятникова задня стінка 4 керується гідроциліндром 9, переміщується у внутрішній порожнині телескопічної секції 5 по напрямних, установлених на напівкруглому днищі, та має ребордні колеса 10 й бокові опорні ролики 11.

Телескопічна секція 5 та маятникова задня стінка 4 мають спільний шарнір кріплення 12, що являє собою спільну вісь їх

обертання.

Технологія заповнення ковша відбувається таким чином.

На початку процесу заповнення ковша 1 телескопічна секція 5 перебуває в крайньому лівому положенні над ножовою системою, маятникова задня стінка 4 – в задній частині телескопічної секції 5 до упору своїм тильним боком з упорами 13 та

14, виконується заповнення передньої заслінки 3 та телескопічної секції 5. Потім, після їх заповнення, за допомогою гідроциліндрів 6 телескопічної секції 5 та гідроциліндра 9 маятничової задньої стінки 4 вони переміщуються в крайнє праве положення, виконується заповнення ґрунтом середньої частини ковша 1.

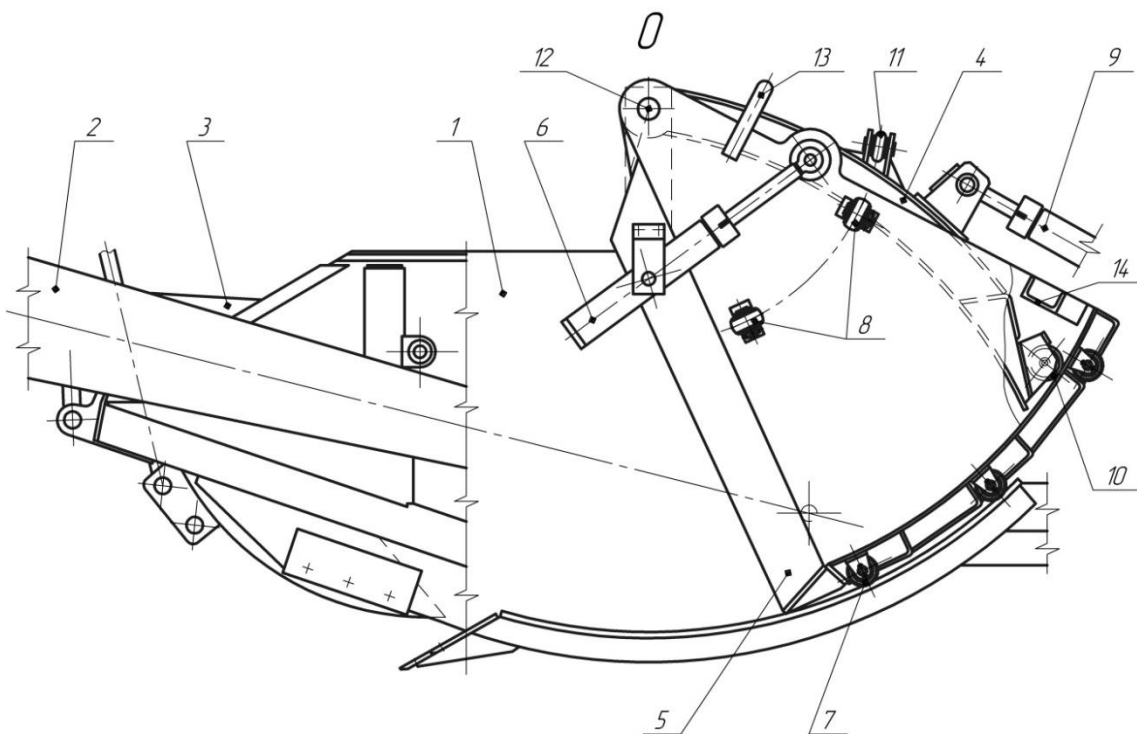


Рис. 1. Запропонована конструкція ковша скрепера телескопічного типу з напівкруглим днищем та маятничовою задньою стінкою: 1 – ківш; 2 – тягова рама; 3 – передня заслінка; 4 – задня стінка маятничового типу; 5 – телескопічна секція ковша; 6, 9 – гідроциліндр; 7, 10 – ребордні колеса; 8, 11 – опорні ролики; 12 – спільний шарнір кріплення; 13 – упор

Розвантаження ковша виконується в такий спосіб.

Зрушення маятничової задньої стінки 4 та переміщення телескопічної секції 5, на початковому етапі, здійснюється гідроциліндрами 6 керування телескопічною секцією 5, котра переміщується в бік ножової системи та упорами 13 і 14 захоплює за собою маятничову задню стінку 4, гідроциліндр 9 якої перебуває в плаваючому положенні. Це зумовлено тим, що гідроциліндр 9 керування маятничовою задньою стінкою 4 повинен подолати «мертву точку» (напрямок дії сили, що розвивається гідроциліндром 9, повинен пройти через точку O , при цьому плече дії цієї відсутнє). Гідроциліндри 6

телескопічної секції працюють штоковими порожнинами.

Після проходження «мертвої точки» та встановлення телескопічної секції 5 в початкове положення (біля ножової системи ковша) подальше розвантаження ковша відбувається поворотом маятничової задньої стінки 4 за рахунок гідроциліндра 9.

Запропоновані конструкція ковша скрепера телескопічного типу з напівкруглим днищем та маятничовою задньою стінкою і двостадійна технологія його заповнення дозволяють самостійно заповнювати ківш за рахунок тягового зусилля базового трактора, а збільшена геометрична місткість – підвищити продуктивність скрепера.

Особливість процесу заповнення телескопічного ковша полягає в поділі процесу на декілька етапів: у даному випадку на три, шляхом використання для цього телескопічної секції ковша та задньої стінки відвального типу. Основна ідея запропонованого способу – заповнення найбільш віддалених від зіву порожнини ковша (передньої глибокої заслінки, порожнини телескопічної секції та порожнини біля задньої стінки) при мінімально-можливій висоті підйому ґрунтового пласта. Заповнення віддалених частин ковша, що відбувається при меншій висоті підйому пласта, тобто і нижчих силових параметрах, забезпечить менші, порівняно з традиційним способом, енергетичні показники робочого процесу скрепера.

З метою усунення вказаних недоліків, збільшення геометричної місткості, зниження опору наповнення ковша та можливості його заповнення за рахунок тягового зусилля базового тягача, базуючись на теоретичних та експериментальних дослідженнях д. т. н., проф. Л. А. Хмари і к. т. н., доц. С. О. Карпушина [3] пропонуємо тристадійну технологію заповнення телескопічного ковша.

Згідно із запропонованою технологією заповнення ковша здійснюється в три стадії.

На першій стадії відбувається заповнення ґрунтом місткості передньої заслінки; на другій – відведення задньої стінки в крайнє положення телескопічної секції та заповнення ґрунтом простору, що утворився; на третій – відведення телескопічної секції з ґрунтом та задньої стінки у максимальнє крайнє положення та заповнення ґрунтом утвореного простору.

Конструктивна схема скрепера з телескопічним ковшем та процес його заповнення згідно з тристадійною технологією наведені на рисунку 2. Передня заслінка 1 (див. рис. 2, а) виконана збільшеної місткості, а поверхня задньої стінки 3 відповідає профілю бульдозерного відвала з постійною кривизною.

Заповнення ковша скрепера згідно з тристадійною технологією здійснюється

таким чином:

– телескопічна секція 4 та задня стінка 3 встановлюються в крайньому лівому положенні біля ножевої системи ковша 2, відбувається занурення ножевої системи в ґрунт (див. рис. 2, б) та максимальнє заповнення передньої заслінки 1 в бульдозерному режимі за рахунок ротації ґрунту, що підіймається по поверхні задньої стінки 3; форма, якої набуває ґрунт на кінцевій стадії заповнення передньої заслінки 1, показана на рисунку 2, в;

– задня стінка 3 відводиться в крайнє заднє положення, що відповідає правому краю телескопічної секції 4, котра залишається у незмінному крайньому лівому положенні; при цьому відбувається часткове обрушення ґрунту з передньої заслінки 1 в зону телескопічної секції 4 (див. рис. 2, г);

– виконується заповнення ґрунтом простору, що утворився між ґрунтом в передній заслінці 1 та задньою стінкою 3 (див. рис. 2, д);

– задня стінка 3 та телескопічна секція 4 відсуваються в свої крайні праві положення, переміщуючи частину набраного ґрунту, котрий частково обрушується у вільний простір ковша (див. рис. 2, е);

– виконується заповнення ґрунтом середньої частини ковша 2 (див. рис. 2, є).

Кінцева стадія наповнення телескопічного ковша згідно з тристадійною технологією показана на рисунку 2, ж.

Конструкція телескопічного ковша скрепера ДЗ–87–1 з додатковою секцією, що керується двома гідроциліндрами й задньою стінкою у формі відвала бульдозера (рис. 3), дозволяє проводити заповнення ковша у три стадії, причому ківш буде повністю заповнений при використанні власної сили тяги базової машини (виключається використання трактора-штовхача) за рахунок зниження зусиль наповнення ковша.

Телескопічний ківш скрепера (рис. 3) містить бічні стінки 1, нерухоме днище 2, жорстко з'єднане з бічними стінками 1, ножі 3, плаваючу секцію 4 на роликах 5, що керується гідроциліндрами 6, заслінку 7,

шарнірно закріплену на бічних стінках 1 та керується гідроциліндром 8, задню стінку 9, з'єднану з гідроциліндром 10 і так само обладнану для зменшення опору при пересуванні опорними роликками 11.

Працює ківш таким чином.

Перед заглибленням телескопічного ковша в ґрунт за допомогою гідроциліндрів 6 й 10 плаваюча секція 4 і задня стінка 9 переміщуються вперед доти, поки плаваюча секція 4 не висунеться вперед на довжину ходу гідроциліндра 6, що встановить плаваючу секцію 4 і задню стінку 9 над ножовою системою ковша.

У такому положенні відбувається заповнення передньої заслінки 7.

Після того як передня заслінка повністю заповнена, задня стінка 9 відсувається в крайнє положення (у кінець плаваючої секції 4), тим самим утворюються вільний простір у ковші – між ґрунтом у передній заслінці й задньою стінкою, внаслідок чого опір зникає й відбувається заповнення плаваючої секції 4 ковша ґрунтом до реалізації максимальної сили тяги базової машини по зчепленню (друга стадія заповнення).

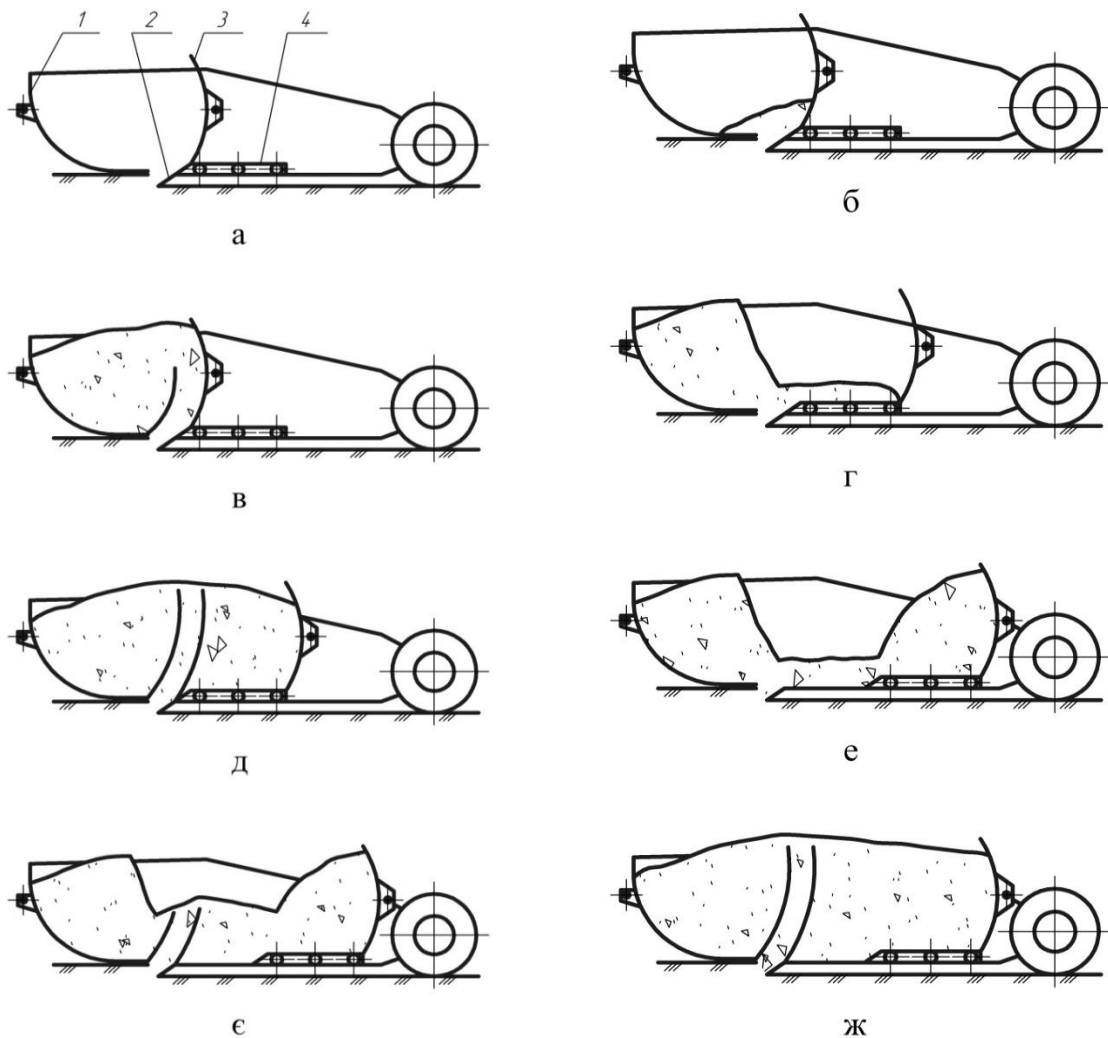


Рис. 2. Процес заповнення телескопічного ковша скрепера в три стадії :

1 – передня заслінка; 2 – ківш; 3 – задня стінка; 4 – телескопічна секція; а – конструктивна схема телескопічного ковша; б – початок заповнення передньої заслінки; в – кінцева стадія заповнення передньої заслінки; г – відведення задньої стінки в крайнє праве положення телескопічної секції; д – процес заповнення телескопічної секції; е – переміщення телескопічної секції та задньої стінки в крайнє праве положення; є – процес заповнення середньої частини ковша; ж – кінцева стадія наповнення телескопічного ковша

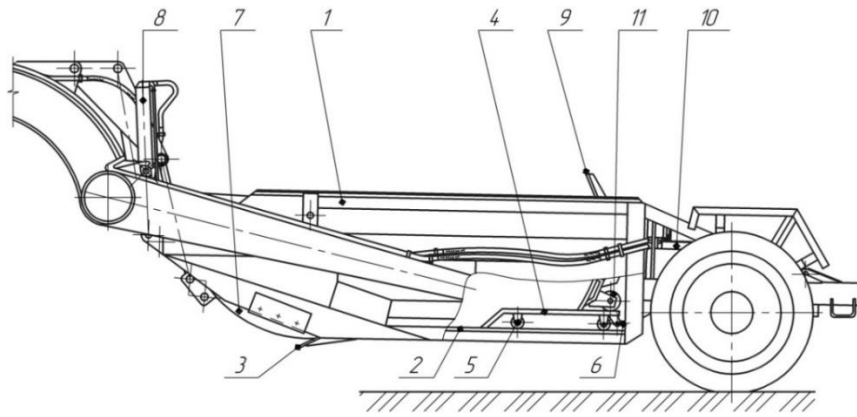


Рис. 3. Запропонована конструкція ковша скрепера телескопічного типу з глибокою передньою заслінкою, телескопічною плаваючою секцією та задньою стінкою у формі бульдозерного відвала: 1 – бічні стінки; 2 – нерухоме днище; 3 – ножова система; 4 – телескопічна плаваюча секція; 5, 11 – опорні ролики; 6, 8, 10 – гідроциліндр; 7 – глибока передня заслінка; 9 – задня стінка

Після набору ґрунту плаваюча секція 4 із ґрунтом і задньою стінкою 9 відсуваються в крайнє праве положення, знову утворюється вільний простір, у який і надходить зрізаний ґрунт (третя стадія заповнення).

Таким чином, заповнення ковша відбувається, як було сказано раніше, в три стадії, причому заповнення відбувається й під час відсування задньої стінки, що сприяє безперервному циклу роботи.

Вивантаження ґрунту з ковша виконують при піднятій заслінці, при цьому між нижніми точками заслінки й ножами утвориться щілина, через яку ґрунт, що

перебуває в заслінці, висипається.

Далі, за допомогою гідроциліндра 10 задня стінка 9 переміщається вперед, таким чином, та частина ґрунту, що лишилася, вивантажується.

Висновок

Запропоновано конструкції ковшів скреперів телескопічного типу збільшеної місткості та технології їх заповнення, що дозволяють виконувати заповнення ковша за рахунок тягового зусилля тягача, а збільшений геометричний об'єм ковша – підвищити продуктивність скрепера в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хмара Л. А., Кравець С. В., Скоблюк М. П. та ін. *Машини для земляних робіт* : підруч. за заг. ред. Л. А. Хмари та С. В. Кравця. Харків : ХНАДУ, 2014. 548 с.
2. Хмара Л. А., Кравець С. В., Нічке В. В., Назаров Л. В., Скоблюк М. П., Нікітін В. Г. *Машини для земляних робіт* : навч. посіб. за заг. ред. Л. А. Хмари та С. В. Кравця. Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 2010. 557 с.
3. Хмара Л. А., Карпущин С. А., Кріль Р. Н., Прусаков Д. В. *Повышение эффективности рабочих процессов скреперов* : матер. 1-ї міжнар. конф. «Наука і освіта – 98». Т. 5. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 1998. С. 182.

REFERENCES

1. Khmara L.A., Kravets S.V., Skobliuk M.P. and oth. *Mashyny dlia zemlianykh robot* : pidruchnyk [Machines for earthworks : textbook]. Kharkiv : KhNADU Publ., 2014, 548 p. (in Ukrainian).
2. Khmara L.A., Kravets S.V., Nichke V.V., Nazarov L.V., Skobliuk M.P. and Nikitin V.H. *Mashyny dlia zemlianykh robot* : navchalnyi posibnyk [Machines for earthworks : training manual]. Rivne – Dnipropetrovsk – Kharkiv, 2010, 557 p. (in Ukrainian).
3. Khmara L.A., Karpushyn S.A., Krol R.N. and Prusakov D.V. *Povushenye efektyvnosti rabochykh protsessov skreperov* [Improving the efficiency of scraper workflows]. *Materialy 1-oi mizhnar. konf. "Nauka i Osvita-98"* [Materials of the First International Conference "Science and Education – 98"]. Vol. 5, Dnipropetrovsk : "Nauka i Osvita" Publ., 1998, p. 182. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.02.2024.

УДК 69.059.6

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.57.1043

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДЕМОНТАЖУ КОЛОН ЗРУЙНОВАНИХ, ПОШКОДЖЕНИХ І ТИХ, ЩО ВТРАТИЛИ СТІЙКІСТЬ ТА НЕСНУ ЗДАТНІСТЬ У РЕЗУЛЬТАТІ ВИБУХУ

НАУМОВ В. О.^{1*}, *аспір.*,
ПРОЦЕНКО Д. О.², *студ.*

^{1*} Кафедра організації та управління будівництвом, 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, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 950-44-04, e-mail: 17061.protsenko@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-3345-2278

Анотація. Технології та організація демонтажу зруйнованих, пошкоджених колон і тих, що втратили стійкість та несну здатність у результаті дії динамічних навантажень під час вибуху – дуже актуальна тема, оскільки ці події стали надзвичайно частими в сучасному світі, і майже завжди викликають пошкодження будівель та споруд як цивільної, так і промислової інфраструктури. Демонтаж таких конструкцій – це необхідний етап у знесенні старих будівель для будівництва нових, а також відновлення та реконструкції будівель та інфраструктури. Розроблення та вдосконалення технологічних методів та способів демонтажу пошкоджених колон, створення нових механізмів та пристроїв має велике практичне значення в будівництві та реконструкції об'єктів інфраструктури. **Мета роботи:** дослідження методики вибору ефективних ОТР, які забезпечують інтенсифікацію демонтажних робіт та скорочення терміну реконструкції та відновлення будівель та споруд. **Об'єкт дослідження:** технологічні процеси, які відбуваються під час демонтажу сучасних конструкцій. **Предмет дослідження:** технологічні параметри та техніко-економічні показники технологічних процесів, які необхідно виконати під час демонтажу сучасних конструкцій, базуючись на можливостях української будівельної галузі. **Виклад матеріалу.** Щоб досягнути мети дослідження виконані такі завдання:

- проаналізовано, яку частину від об'єму всієї будівлі займають залізобетонні та металеві колони;
- знайдено конкретні приклади реального використання різних методів демонтажу колон пошкоджених або зруйнованих вибухом;
- проаналізовано частоту використання різних методів демонтажу колон;
- визначено ключові фактори, які впливають на обрання методу демонтажу колон.

Результати дослідження дозволяють обрати найефективніший ОТР який забезпечує інтенсифікацію демонтажних робіт і скорочення терміну реконструкції та відновлення будівель та споруд.

Ключові слова: будівля; споруда; метод; спосіб; зруйновані вибухом; пошкоджені; динамічні навантаження

TECHNOLOGIES AND ORGANIZATION OF DISMANTLING COLUMNS DESTROYED, DAMAGED AND THOSE THAT LOST STABILITY AND BEARING CAPACITY AS A RESULT OF THE EXPLOSION

NAUMOV V.O.^{1*}, *Postgraduate Student*,
PROTSENKO D.O.², *Stud.*

^{1*} Department of Construction Organization and Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., 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, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 950-44-04, e-mail: 17061.protsenko@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-3345-2278

Abstract. The technologies and organization of the dismantling of destroyed, damaged columns and those that have lost stability and bearing capacity as a result of dynamic loads during an explosion is a very relevant topic, since these events have become extremely frequent in the modern world, and almost always cause damage to buildings and

structures, such as civil and industrial infrastructure. The dismantling of such structures is a necessary stage in the demolition of old buildings for the construction of new ones, as well as the restoration and reconstruction of buildings and infrastructure. The development and improvement of technological methods and ways of dismantling damaged columns, the development of new mechanisms and devices is of great practical importance in the construction and reconstruction of infrastructure facilities. *The purpose of the article* is to study the methodology for the selection of effective OTD, which ensure the intensification of dismantling works and the reduction of the period of reconstruction and restoration of buildings and structures. *The object of research*: technological processes that occur during the dismantling of modern structures. *The subject of the study*: technological parameters and technical and economic indicators of technological processes, which must be performed during the dismantling of modern structures, based on the capabilities of the Ukrainian construction industry. *Presentation of the material*. To achieve the goal of the study, the following tasks were performed:

- it was analyzed what part of the volume of the entire building is occupied by reinforced concrete and metal columns;
- specific examples of the real use of various methods of dismantling columns damaged or destroyed by an explosion were found;
- the frequency of use of various methods of dismantling columns was analyzed;
- the key factors affecting the choice of column dismantling method are determined.

The result of the study will allow to choose the most effective OTD that ensures the intensification of dismantling works and shortening the period of reconstruction and restoration of buildings and structures.

Keywords: *building; building; method; way; destroyed; explosion; damaged; dynamic loads*

Вступ. Колони – це одні з найважливіших елементів структурної системи будівлі, оскільки вони витримують основну частину несної здатності будівлі. Згідно з даними, отриманими за допомогою літературного огляду та штучного інтелекту GPT4 від OpenAI, в середньому залізобетонні колони займають від 5 до 10 % об'єму будівельної конструкції, виміряного в куб. м, тоді як металеві колони займають від 3 до 5 % виміряного в тоннах. Проте, цей об'єм може змінюватися залежно від різних факторів, таких як розмір будівлі, її функціональне призначення, проектувальні рішення та вимоги щодо міцності та безпеки.

Наприклад, у багатоповерхових будівлях, де необхідна підвищена міцність і стійкість, об'єм колон може бути збільшеним. Також, для забезпечення оптимальної міцності та стійкості конструкції, можуть використовуватися різноманітні форми та розміри колон, що теж впливає на їх об'єм у споруді. У випадку пошкодження колон від вибухових дій, за результатами обстеження, їх необхідно або демонтувати, або відновити несну здатність для забезпечення стійкості будівлі.

Однак демонтаж колон це складний процес, який потребує детального планування та використання спеціального обладнання та техніки. Крім того необхідно

забезпечити захист інших елементів споруди під час демонтажу колон. Також важливо враховувати, що колони – це вертикальні стержневі конструкції, які використовуються в каркасному будівництві багатоповерхових, промислових, адміністративних будівлях та мають різні розміри й форми, залежно від їх призначення та місця у будівельній конструкції.

Для виконання робіт із відновлення функціонування будівель та споруд потрібне більш детальне розуміння питання щодо технології демонтажу та відновлення колон, адже правильний підхід до цих процесів визначає безпеку всієї будівлі та її майбутнє функціонування. Для цього треба розглянути види пошкоджень залізобетонних та металевих колон.

Професійний демонтаж колон потребує технічної експертизи, обстеження будівлі та уважного планування для забезпечення безпеки та стійкості конструкції.

Види пошкодження залізобетонних та металевих колон від дії динамічних навантажень під час вибуху. Розглядаються види пошкоджень колон від вибухових дій та їх можливі технологічні методи демонтажу.

Пошкодження залізобетонних та металевих колон внаслідок вибуху різноманітні. При пошкодженні

залізобетонних конструкцій можуть статися: розтріскування бетону, деформація колони та руйнування арматури. Деякі з них видимі одразу, інші можуть з'явитися через певний час після вибуху.

Розтріскування бетону може бути поверхневим або проникати в глибину. Інший вид – *відколи* частин бетону, які можуть бути більш або менш помітними, залежно від розміру та місця відколу.

Руйнування арматури: арматура може бути пошкоджена або зігнута внаслідок вибуху, що спричиняє погіршення міцності колони. Ці пошкодження можуть зменшити стійкість та міцність колони, що впливає на здатність будівлі витримувати навантаження та збільшить ризик її обвалення або руйнування. Це стає небезпечним для людей, які перебувають у її безпосередній близькості. В таких випадках потрібно посилити або демонтаж конструкції, а саме колон.

Металеві колони можуть отримати деформацію, розриви та руйнування зв'язків.

Деформація: металеві колони можуть бути зігнуті або сплюснені в результаті вибуху. Це спричинить порушення геометричної форми колони та порушення її стійкості.

Розрив: металева колона може бути розірвана на шматки.

Руйнування зв'язків: металеві колони мають зв'язки, які забезпечують міцність конструкції. Вибух може їх пошкодити, що викличе порушення стійкості всієї конструкції.

Методи та способи демонтажу колон, пошкоджених вибухом. Для демонтажу колон, які втратили стійкість та несну здатність у результаті дії динамічних навантажень під час вибуху, необхідно дотримуватись високих стандартів безпеки. Виконання таких робіт може не тільки пошкодити навколишні будівлі та майно, а і створити серйозні загрози для життя та здоров'я людей.

Розрізняють такі найпоширеніші методи демонтажу залізобетонних колон:

1) механізований;

2) вибуховий;

3) гідроабразивний.

У більшості випадків для демонтажу залізобетонних колон після вибуху застосовують механічний та вибуховий методи, що становлять близько 60–70 % усіх випадків тоді, як до гідроабразивного методу вдаються приблизно у 20–30 % випадків.

В останні роки механізований метод демонтажу залізобетонних колон стає все більш популярним у багатьох країнах, оскільки він дозволяє ефективно та безпечно виконувати роботи з демонтажу в складних умовах. Вибуховий та гідроабразивний методи також застосовуються, проте вони менш популярні через обмеження простору.

Механізований метод демонтажу залізобетонних колон широко застосовується в будівництві, зокрема, у великих промислових комплексах зі складними конструкціями залізобетонних колон. До нього вдаються тоді, коли пошкодження колони незначні або колона повинна бути знята з-під підвіски, але він неефективний у випадках важкого пошкодження колони, коли необхідно видалити значну кількість матеріалу.

Залізобетонні колони, пошкоджені внаслідок вибуху, зазвичай демонтують способом гідромолоту та крану.

Метод демонтажу № 1 (механізований). Основні кроки демонтажу механічним методом:

1. *Підготовка робочої зони.* Для безпеки роботи необхідно забезпечити вільний доступ до колони та зони, де розміщаються робітники та техніка. Для цього зону безпеки огорожують спеціальною стрічкою.

2. *Підготовка колони.* Перед початком демонтажу з колони знімають усі деталі, які можуть перешкоджати роботі гідромолота. Для цього можуть використовуватися різноманітні інструменти та обладнання, наприклад, болгарки.

3. *Кріплення колони.* Щоб уникнути обвалу колони, її необхідно зафіксувати. Для цього кран тримає колону зі стропами внатяг, або використовують спеціальну підставку з кріпленнями.

4. *Демонтаж.* Після закріплення колони екскаватор з гідромолотом починає роботу. Оператор регулює режим роботи та напрямок дії на колону. Гідромолот розбиває бетонну частину колони знизу.

5. *Зняття арматури.* Після розбивання бетонної частини колони зрізають арматуру. Для цього використовуються різноманітні різальні інструменти або обладнання.

Після землетрусу в 2010 році на Гаїті застосовували механізований метод демонтажу за допомогою гідромолота.

Метод демонтажу № 2 (вибуховий). Вибуховий метод демонтажу залізобетонної пошкодженої колони – це процес руйнування за допомогою контрольованого вибуху.

Там, де доступність до колон складна і немає можливості використати інші методи демонтажу, або колони мають складну геометрію, що ускладнює роботу. Його також використовують у випадках, коли треба демонтувати конструкцію в забрудненому середовищі.

За допомогою методу «Вибух» були демонтовані залізобетонні колони перевантажувального обладнання фабрики дроблення на об'єкті ЦГЗК.

Технологічна послідовність дій для демонтажу пошкодженої залізобетонної колони, методом вибуху така:

1. *Підготовчі роботи:* підготовка майданчика, виконання мінних отворів.

2. *Встановлення вибухового матеріалу:* у мінні отвори закладаються заряди вибухового матеріалу залежно від розмірів та форми колони.

3. *Проведення контрольованого вибуху:* після встановлення всіх зарядів та перевірки безпеки виконується вибух, що призводить до руйнування колони.

4. *Очищення майданчика:* після вибуху майданчик очищають від залишків руйнування та відходів вибухового матеріалу.

Метод демонтажу № 3 (механічний). Демонтаж залізобетонної колони гідроабразивним методом полягає у використанні водяних струменів під високим тиском для руйнування

конструкції. Для цього вдаються тоді, коли інші методи недоцільні або неможливі, наприклад, коли не можна використовувати вибухові речовини, або коли не можна створити необхідні умови для механічного демонтажу, через високу чутливість на шум та вібрації, можливість обвалу сусідніх конструкцій

Технологічна послідовність дій для демонтажу пошкоджених залізобетонних колон механічним методом така:

1. *Оцінка пошкоджень і підготовка робочої зони:* Першим етапом буде оцінка пошкоджень, а також підготовка робочої зони. Вона включає в себе відмежування та забезпечення захисними елементами, що запобігають падінню уламків.

2. *Підготовка обладнання та безпеки:* Для роботи необхідне спеціальне обладнання (наприклад алмазно-канатна пила), яка повинна бути перевірена на наявність пошкоджень та готовність до роботи. Також потрібно враховувати вимоги безпеки, включаючи використання особистого захисту та відповідне навчання персоналу.

3. *Оцінка структури та напрямку демонтажу:* Перед початком робіт необхідно оцінити структуру колони та визначити оптимальний напрямок різки. Це дозволить забезпечити точне розрізання і мінімізувати ризик подальшого пошкодження.

4. *Проведення демонтажу:* Демонтаж (наприклад алмазно-канатною пилою) залізобетонної колони починається з урахуванням попередньо визначеного напрямку різання та умов робочої зони.

5. *Демонтаж уламків та очищення майданчика:* Після різання колони необхідно видалити уламки та очистити майданчик від залишків матеріалів, використовуючи для цього відповідне обладнання та інструменти.

Утилізація відходів: Завершальним етапом буде утилізація відходів, яка передбачає вивезення бетонних та металевих відходів на полігон для подальшої переробки або утилізації.

Механічний метод застосовувався в 2017 року в місті Берлін, при демонтажі колон будівельного комплексу, який потребував демонтажу своїх старих залізобетонних конструкцій для подальшої реконструкції, використовував механічний метод під час демонтажу колон. Одна з колон була пошкоджена під час попереднього вибуху, і її необхідно було видалити безпечно та ефективно.

Демонтаж металевих колон. Демонтаж металевих колон, які втратили стійкість та несну здатність в результаті дії динамічних навантажень під час вибуху, має свої особливості, тому застосовуються такі найбільш поширені методи:

1. Метод по елементного розрізання. Частота застосування якого приблизно 60–70 % випадків.

2. Гідроабразивний метод. На даний метод припадає приблизно 30–40 % випадків використання.

Метод демонтажу № 1 (поелементне розрізання). Розрізання металевих елементів – один зі способів демонтажу металевих колон. Сфера застосування даного методу поширюється на колони, які не можна відновити або відремонтувати. Технологічна послідовність дій у процесі демонтажу металевої колони методом розрізання металевих елементів така:

1. *Підготовчі роботи:* забезпечення безпеки на місці робіт, установка захисних бар'єрів, зонування робочої ділянки, підготовка необхідної техніки та інструментів.

2. *Розрізання колони:* за допомогою газового різача або іншого спеціального обладнання розрізають металеві елементи колони на менші частини, щоб їх можна було безпечно видалити.

3. *Видалення частин колони:* розрізані металеві елементи піднімають за допомогою крана та видаляють з місця робіт. Для цього можуть знадобляться спеціальні контейнери або транспортні засоби.

4. *Знешкодження залишків:* залишки колони, які залишилися на місці після видалення ділянок, знищують або

знешкоджують за допомогою спеціальної техніки або обладнання.

5. *Утилізація:* зібрані матеріали транспортують на спеціальне підприємство для подальшої утилізації або переробки.

Один із прикладів застосування методу по елементного розрізання для демонтажу металевих колон – проект «Demolition of steel columns using diamond wire cutting technique» компанії CSDA member Protec Cutting Services. У цьому проекті використовувались тонкі алмазні дроти для розрізання сталевих колон на шматки. Цей метод дозволяє точно контролювати розмір і форму отриманих шматків і знижує кількість шуму та пилу, порівняно з іншими методами демонтажу.

Метод демонтажу № 2 (гідроабразивний). Демонтаж металевої колони, пошкодженої вибухом, гідроабразивним методом більш безпечний та швидкий порівняно з методом розрізання металевих елементів. Гідроабразивний метод ефективний у демонтажі при виконанні робіт в обмеженому просторі та у важкодоступних місцях.

Послідовність виконання демонтажу:

1. *Підготовчі роботи:* встановлення обладнання, утилізація будівельних відходів, захист довкілля тощо.

2. *Встановлення гідравлічного верстата,* що складається з двох гідравлічних насосів, гідроциліндра та різального інструмента. Верстат встановлюють поблизу колони і закріплюють на фундаменті.

3. *Розмітка різального шва:* фахівці роблять розмітку на місці різального шва, відмічаючи точки початку та кінця розрізання, а також глибину різку.

4. *Розрізання колони:* після розмітки фахівці починають розрізання колони з використанням гідравлічного верстата. Різальний інструмент вставляється в у місце розташування шва де відбуватиметься різання конструкції, після чого гідроциліндр починає працювати і розрізає метал.

5. *Прибирання:* відходи потрапляють на переробку для подальшого використання.

6. *Утилізація колони*: коли робота з розрізанням закінчена, деталі демонтують, а зв'язувальний метал здають на переробку.

У 2018 році в Німеччині після того, як вибух у магазині перетворив його на руїни, команда демонтажників за допомогою гідравлічних зрізів демонтували залишки металевих колон, використовуючи різальні машини з водним струменем.

Висновки

На основі зібраних даних, про види пошкоджень колон від дії динамічних навантажень під час вибуху, маємо статистику видів пошкоджень:

Залізобетонні колони. *Розтріскування*: Приблизно 30–40 % залізобетонних колон, що піддаються дії динамічних навантажень вибуху, мають пошкодження у вигляді розстріскування. Це можуть бути тріщини та руйнування поверхні колони, які виникають внаслідок дії вибухової хвилі.

Деформації. Майже 50–60 % залізобетонних колон зазнають деформацій після вибуху. Це зміщення, згини та викривлення.

Руйнування арматури. Приблизно 10–20 % пошкоджених залізобетонних колон можуть мати перерізані або переламані арматурні стержні.

Металеві колони. *Деформація*. Приблизно 30–40 % металевих колон можуть зазнати деформацій, таких як згин, скручення або розтяг, внаслідок вибуху.

Розрив. Приблизно 10–20 % металевих колон отримують розриви або тріщини.

Руйнування зв'язків. Близько 10–20 % пошкоджених металевих колон можуть мати

пошкодження зв'язків, таких як зламани з'єднувальні елементи або втрата їх стійкості.

Розглянувши методи демонтажу залізобетонних та металевих колон, можна зробити висновки:

- Механізований метод демонтажу колон, пошкоджених вибухом – швидкий та ефективний, але вимагає значних витрат на обладнання та робочу силу. Застосовується в основному для демонтажу великих будівель та споруд і є найпоширенішим методом демонтажу (60–70 % випадків).

- Метод вибуху дозволяє швидко демонтувати колони, але потребує спеціальних навиків та знань з безпеки. Придатний якщо немає належної доступності до колон або колони мають складну геометрію (60–70 % випадків).

- Метод механічний застосовується для демонтажу залізобетонних колон в умовах обмеженого доступу. Він більш безпечний, ніж метод вибуху, але менш ефективний, ніж механізований метод. Використовується у 20–30 % випадках.

- Метод розрізання застосовують для демонтажу металевих колон в умовах обмеженого доступу та неможливості інших методів. Вимагає високопродуктивного обладнання та відповідних навиків робітників (60–70 % випадків).

- Метод гідроабразивний придатний для демонтажу металевих колон в умовах обмеженого доступу, більш безпечний та менш шумний, ніж метод розрізання. Застосовується у 30–40 % випадків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скрипник О. С., Іващенко М. Ю. Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій : конспект лекцій для студентів денної та заочної форм навчання, першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 263 – Цивільна безпека, освітня програма «Цивільний захист». Харків : Харків нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2021. 158 с.
2. Васильченко О. В., Квітковський Ю. В., Миргород О. В., Стельмах О. А. Будівельні конструкції та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій : навч. посіб. Харків : ХНАДУ, 2015. 488 с.
3. Штучний інтелект. URL: <https://openai.com/gpt-4>

REFERENCES

1. Skrypnyk O.S. and Ivashchenko M.Yu. *Budivli i sporudy ta yikh povedinka v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy : konspekt lektsiy dlya studentiv dennoyi ta zaochnoyi form navchannya, pershoho (bakalavrs'koho) rivnya*

vyshchoyi osvity spetsial'nosti 263 – Tsyvil'na bezpeka, osvitnya prohrama “Tsyvil'nyy zakhyst” [Buildings and structures and their behavior in emergency situations: a summary of lectures for full-time and part-time students of the first (bachelor) level of higher education, specialty 263 – Civil safety, educational program “Civil Defense”]. Kharkiv : National City University Farm named O.M. Beketov, 2021, 158 p. (in Ukrainian).

2. Vasylchenko O.V., Kvitkovskiy Yu.V., Myrhorod O.V. and Stelmakh O.A. *Budivel'ni konstruktsiyi ta yikh povedinka v umovakh nadzvychnykh sytuatsiy : navch. posibnyk* [Building structures and their behavior in emergency situations : training manual]. Kharkiv : KhNADU Publ., 2015, 488 p. (in Ukrainian).

3. *Shtuchnyy intelekt* [Artificial intelligence]. URL: <https://openai.com/gpt-4> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 04.02.2024.

УДК 697.2:519.87:536.423.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.64.1044

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ТРУБЧАСТИМИ ГАЗОВИМИ НАГРІВАЧАМИ У БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗА РОБОТИ В РЕЖИМІ КОНДЕНСАЦІЇ

ПРОКОФ'ЄВА Г. Я.¹, канд. техн. наук, доц.,

БЕРЕЗЮК Г. Г.^{2*}, ст. викл.,

ТКАЧОВА В. В.³, канд. техн. наук, доц.,

СОЛОД Л. В.⁴, канд. техн. наук, доц.,

АДЕГОВ О. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: chornomorets.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

^{2*} Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: berezuk.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

³ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

⁴ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

⁵ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: adehov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Анотація. Постановка проблеми. Застосування сучасних автономних систем теплопостачання – один із напрямків зменшення споживання природних енергоресурсів. Існує велика кількість різних автономних систем теплопостачання об'єктів. Один із варіантів таких систем – це система з застосуванням трубчастих газових нагрівачів. Трубчастий газовий нагрівач складається з газового пальника, випромінювальної труби та вентилятора. Технічним рішенням застосування цього обладнання у системі теплопостачання став трубчастий нагрівач, розташований всередині будівельної конструкції. Підвищення ефективності роботи газового обладнання можливо досягти за рахунок роботи цього обладнання в конденсаційному режимі. Відповідно і можливість роботи трубчастих газових нагрівачів у будівельних конструкціях у конденсаційному режимі досить цікава з погляду підвищення ефективності використання теплового потенціалу газоподібного палива та забезпечення його економії. Для дослідження і практичного конструювання автономних систем теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях з урахуванням конденсаційного режиму роботи необхідна математична модель розрахунку теплових і гідравлічних режимів системи. **Мета статті** – побудувати математичну модель системи автономного теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях під час роботи в режимі конденсації. **Висновок.** Розроблено та представлено у вигляді диференційних рівнянь математичну модель гідравлічного і теплового режимів автономної системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях для роботи в режимі конденсації. В основі є рівняння збереження маси, руху та енергії для газоповітряної суміші всередині каналу в умовах двофазного потоку, рівняння переносу тепла всередині будівельної конструкції, рівняння тепловіддачі від поверхні нагрівача до навколишнього середовища. Математична модель гідравлічного і теплового режимів автономної системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях під час роботи в режимі конденсації дозволить розраховувати і конструювати такі системи.

Ключові слова: трубчасті газові нагрівачі; математична модель; конденсація водяної пари

MATHEMATICAL MODELING OF THE AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEM WITH TUBULAR GAS HEATERS IN BUILDING STRUCTURES WHEN OPERATING IN THE CONDENSATION MODE

PROKOFIEVA H.Ya.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BEREZIUK H.H.^{2*}, *Senior Lecturer*,
TKACHOVA V.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SOLOD L.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ADEHOV O.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: chornomorets.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

^{2*} D Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: berezuiik.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

³ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

⁴ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

⁵ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-34-92, e-mail: adehov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Abstract. Problem statement. The application of modern autonomous heat supply systems is one of the directions of reducing the consumption of natural energy resources. There are many different autonomous systems of heat supply of objects. One of the variants of such systems is the system with tube gas heaters. A tube gas heater consists of a gas burner, a radiating tube and a fan. One of the technical solutions for such heat supply systems is a tubular heater located inside the building structure. Increase of the efficiency of gas equipment can be achieved by operating this equipment in the condensation mode. Therefore, the operation of tubular gas heaters in building structures in the condensation mode is quite interesting in terms of increasing the efficiency of utilisation of the thermal potential of gaseous fuel and ensuring its saving. For research and practical design of autonomous heat supply systems with gas tube heaters in building structures with regard to the condensation mode of operation it is essential to develop a mathematical model for calculating the thermal and hydraulic modes of the system. **The purpose of the article** is to develop a mathematical model of an autonomous heat supply system with tubular gas heaters in building structures when operating in the condensation mode. **Conclusion.** The mathematical model of hydraulic and thermal modes of autonomous heat supply system with tubular gas heaters in building structures when operating in the condensation mode was developed. It is presented in the form of differential equations. The model is based on the equations of conservation of mass, motion and energy for the gas-air mixture inside the canal in two-phase flow, the equation of heat transfer inside the building structure, the equation of heat transfer from the external surface of the heater to the environment. The mathematical model of hydraulic and thermal modes of autonomous heat supply system with tubular gas heaters in building structures when operating in the condensation mode will be used to calculate and design such systems.

Keywords: *gas tube heaters; mathematical model; condensation of water vapor*

Постановка проблеми. Застосування сучасних автономних систем теплопостачання стало одним із напрямків скорочення споживання природних енергоресурсів. Існує велика кількість різних автономних систем теплопостачання об'єктів. Один із варіантів таких систем – це система із застосуванням трубчастих газових нагрівачів.

Трубчастий газовий нагрівач складається з газового пальника, випромінювальної труби та вентилятора [1]. Технічним рішенням застосування цього обладнання у системі теплопостачання став трубчастий нагрівач, розташований всередині будівельної конструкції [2].

Підвищення ефективності роботи газового обладнання можливо досягти за рахунок роботи цього обладнання в

конденсаційному режимі. Відповідно і можливість роботи трубчастих газових нагрівачів у будівельних конструкціях у конденсаційному режимі досить цікава з погляду підвищення ефективності використання теплового потенціалу газоподібного палива та забезпечення його економії. Для дослідження і практичного конструювання систем теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами (ТГН) у будівельних конструкціях (БК) з урахуванням конденсаційного режиму роботи необхідна математична модель розрахунку теплових і гідравлічних режимів системи.

Аналіз публікацій. Математичні моделі трубчастих газових нагрівачів описані в працях [3–5], де математична модель нагрівача розглядається як гідравлічний ланцюг із розподіленими параметрами відповідно до теорії гідравлічних ланцюгів. Режим конденсації в цих математичних моделях не враховується.

Математичному моделюванню трубчастого газового нагрівача розташованого в опалюваному просторі, який може працювати у конденсаційному режимі, присвячені праці [6; 7].

Математична модель ділянки для трубчастих газових нагрівачів у будівельних конструкціях розроблена у статті [8]. При цьому математичне моделювання системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях під час роботи в режимі конденсації не розглядалось.

Мета статті – побудувати математичну модель системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами у просторі будівельних конструкцій за роботи в режимі конденсації.

Виклад матеріалу. Автономна система теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях має просту конструкцію. Розміщення каналів у будівельній конструкції (план та розріз каналу) наведено на рисунку 1.

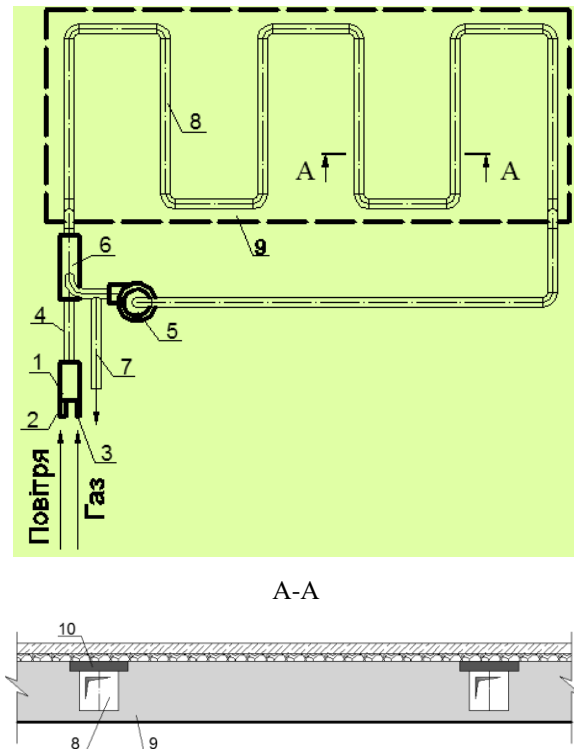


Рис. 1. Автономна система теплопостачання з ТГН у середовищі будівельних конструкцій:

- 1 – пальник; 2 – патрубок для подачі повітря;
- 3 – патрубок для подачі газу; 4 – початок лінійного нагрівача в теплоізоляції; 5 – вентилятор;
- 6 – ежектор; 7 – патрубок для відведення газоповітряної суміші; 8 – канали системи з газоповітряною сумішшю; 9 – будівельна конструкція підлоги;
- 10 – зовнішня будівельна пластина

Принцип роботи цієї системи такий само, як і трубчастого нагрівача, вільно розташованого в опалюваному просторі. Продукти згоряння з пальника надходять до каналів системи, які потім передають тепловий потік зі своєї поверхні в середовище будівельної конструкції, а звідти назовні.

Для підвищення ефективності роботи такого автономного теплопостачання запропоновано використання системи у конденсаційному режимі роботи.

Виникає необхідність розроблення математичної моделі для розрахунку теплових і гідравлічних режимів.

Спираючись на розробки [6–8], наводимо математичну модель системи теплопостачання з ТГН у середовищі будівельних конструкцій за роботи в режимі конденсації.

Тепловий та гідродинамічний режими роботи системи розглядаються стаціонарними і по одній поздовжній довжині нагрівача координаті z , а через простір будівельної конструкції – двовимірні по x та y координатах.

Розглядаються такі умови для системи:

Закони Кірхгофа (перший та другий) у матричній формі:

$$A \cdot V + Q = 0; \quad (1)$$

$$B \cdot H = 0. \quad (2)$$

Рівняння втрат тиску по ділянкам:

$$H + \bar{A} \cdot \bar{P} = 0, \quad (3)$$

де A – матриця з'єднань ланцюга; B – матриця контурів ланцюга; $V = \{v_i\}$ – вектор масових витрат по ділянках, $i = \overline{1, n}$; $Q = \{q_j\}$ – вектор масових витрат у вузлах, $j = \overline{1, m}$; $\bar{P} = \{P_j\}$ – вектор втрат тиску у вузлах, $j = \overline{1, m}$; $H = \{h_i\}$ – вектор втрат тиску по ділянках, $i = \overline{1, n}$.

Рівняння втрати тиску на i -й ділянці:

$$h_i = \int_0^{l_i} dP_i \cdot dz_i, \quad (4)$$

де z_i – довжина i -ї ділянки.

По ділянках перепад тиску залежно від витрати v_i , температури T_i , густини ρ_i та швидкості w_i :

$$dP_i(z_i) = \psi_i(v_i, T_i(z_i), \rho_i(z_i), w_i(z_i), dT_i, d\rho_i, dw_i), \quad (5)$$

де v_i – витрата суміші в середині каналу системи на i -й ділянці; $w_i(z_i)$ – швидкість руху суміші в середині каналу системи на i -й ділянці; $T_i(z_i)$ – температура суміші в середині каналу системи на i -й ділянці; $\rho_i(z_i)$ – густина суміші в середині каналу системи на i -й ділянці.

Для вузлів ланцюга рівняння балансу енергії:

$$\sum_{i \in I_{\text{вихід}}} v_i(l_i) \cdot C_{P_i} T_i(l_i) = \sum_{i \in I_{\text{вхід}}} v_i(0) \cdot C_{P_i} T_i(0), \quad j \in J, \quad (6)$$

де $I_{\text{вихід}}$ – множина ділянок, які входять до вузла j ; $I_{\text{вхід}}$ – множина ділянок, які виходять з вузла j ; C_{P_i} – теплоємність газоповітряної суміші за сталим тиском, Дж/кг °С.

Допустимі обмеження на значення швидкості та температури відповідно:

$$w_i(z_i) \leq w_i^{\text{дон}}(z_i); \quad (7)$$

$$T_i(z_i) \leq T_i^{\text{дон}}(z_i), \quad (8)$$

де $w_i^{\text{дон}}(z_i)$ – допустима швидкість руху теплоносія в середині каналу системи на i -й ділянці, м/с; $T_i^{\text{дон}}(z_i)$ – допустима температура теплоносія в середині каналу системи на i -й ділянці, °С.

Математична модель елементарної ділянки системи:

Вираз збереження маси:

$$M = \rho w F = \text{const}. \quad (9)$$

Вираз стану газоповітряної суміші у виразі рівняння стану ідеального газу:

$$p = \rho R T. \quad (10)$$

Вираз руху газоповітряної суміші всередині каналу:

$$dp = -\frac{\lambda}{D} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \cdot dz_i + (\rho_a - \rho) \cdot g \cdot dh. \quad (11)$$

Рівняння теплового балансу для елементарної ділянки каналу системи довжиною dz_i у перетині.

Тепловий потік від теплоносія до стінки каналу системи, який передається конвекцією і випромінюванням, Вт:

$$dQ_1 = \Pi_i dz_i \alpha_{\Sigma i} (T - T_{wi}). \quad (12)$$

Зміна теплової енергії потоку теплоносія, що рухається:

$$d(\rho \cdot w F c_p T) = -dQ_1. \quad (13)$$

Розподіл тепла у просторі будівельної конструкції у вигляді рівняння теплопровідності з відповідними граничними умовами:

$$\frac{\partial^2 T_w}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial y_i^2} = 0. \quad (14)$$

Граничні умови для (14):

$$\alpha_{\Sigma i}(T - T_{wi}) = -\lambda \left(\frac{\partial T_w}{\partial n} \right)_{wi} \text{ при } (x_i, y_i) \in wi; \quad (15)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T_w}{\partial n} \right)_{we} = \alpha_{\Sigma e}(T_{we} - T_o) \text{ при } (x_i, y_i) \in we. \quad (16)$$

Тепловий потік від зовнішньої поверхні будівельної конструкції в опалюване середовище, що передається конвекцією і випромінюванням, Вт:

$$dQ_2 = \Pi_e dz_i \alpha_{\Sigma e}(T_{we} - T_o). \quad (17)$$

За стаціонарного теплового режиму:

$$dQ_1 = dQ_2. \quad (18)$$

Математична модель умовної ділянки вентилятора:

$$\Delta P_a = \Phi(M). \quad (19)$$

За законом Кірхгофа (другий закон) алгебраїчна сума втрат тиску у замкненому контурі дорівнює нулю:

$$\int dp(z_i) \cdot dz_i + \sum \Delta P_j(M) - \Delta P_a(M) = 0, \quad (20)$$

де ρ – густина газоповітряної суміші всередині каналу системи, кг/м^3 ; w – середня лінійна швидкість руху суміші, м/с ; p – абсолютний тиск суміші в даному перетині каналу системи, Па; F – площа поперечного перетину каналу системи, м^2 ; T – абсолютна температура суміші в даному перетині каналу системи, $^{\circ}\text{C}$; R – газова стала, що залежить від складу газоповітряної суміші за повного згорання газоподібного палива, $\text{Дж/кг}^{\circ}\text{C}$; dp – перепад тиску газоповітряної суміші у каналі системи на ділянці довжиною dz_i ; D – внутрішній еквівалентний діаметр каналу системи, м; λ – коефіцієнт тертя; $(\rho_a - \rho) \cdot g \cdot dh$ – втрати тиску на самотягу; ρ_a – густина зовнішнього повітря, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; dh – довжина вертикальної ділянки димаря, м; Π_i – внутрішній периметр каналу системи, м; $\alpha_{\Sigma i}$ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі (з урахуванням конвективної і променистої складових) від потоку суміші до стінки

каналу системи, $\text{Вт/м}^2^{\circ}\text{C}$; T_{wi} – температура внутрішньої поверхні каналу системи в даному перетині, $^{\circ}\text{C}$; T_w – температура всередині простору будівельної конструкції, $^{\circ}\text{C}$; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$; T_{we} – температура зовнішньої поверхні випромінювального каналу системи, $^{\circ}\text{C}$; T_o – абсолютна температура повітря в опалюваному приміщенні, $^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{\Sigma e}$ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі (з врахуванням конвективної і променистої складових) від зовнішньої поверхні системи в навколишнє середовище, $\text{Вт/м}^2^{\circ}\text{C}$; $\left(\frac{\partial T_w}{\partial n} \right)_{wi}$, $\left(\frac{\partial T_w}{\partial n} \right)_{we}$ – градієнт температури за напрямком (відповідно) від потоку суміші до стінки каналу системи і від поверхні будівельної конструкції системи в опалюваний простір; Π_e – зовнішній периметр каналу системи, м; ΔP_a – активний напір вентилятора, Па; Φ – функція для певної пари «вентилятор–електродвигун»; $dp(z_i) \cdot dz_i$ – розподіл тиску газоповітряної суміші на ділянці системи з трубчастими нагрівачами; $\sum \Delta P_j(M) i$ – сума втрат тиску газоповітряної суміші в місцевих опорах по шляху руху; M – загальна витрата теплоносія, кг/м^3 ; x_i та y_i – лінійні координати у перетині нагрівача.

При згорянні горючих газів у потоці повітря утворюється газоповітряна суміш, що містить водяну пару. Під час руху суміші вздовж каналу її температура зменшується, що може викликати конденсацію водяної пари з продуктів згорання.

Розглянемо ділянку конденсації системи теплопостачання з ТГН у будівельних конструкціях.

Умова конденсації – відповідність температури газоповітряної суміші (T) температурі насичення водяної пари (T_{eg}) за його парціального тиску:

$$T = T_{eg}(P_n). \quad (21)$$

Парціальний тиск водяної пари визначається співвідношенням:

$$P_n = a_n \cdot P, \quad (22)$$

де P – загальний тиск суміші всередині каналу; a_n – концентрація (об'ємна) водяної пари в газоповітряній суміші.

Об'ємна концентрація водяної пари (a_n) є сталою від місця повного згоряння газу до місця, де можливе випадіння конденсату. Цю величину можна розрахувати за реакціями горіння газоподібного палива, його об'ємним складом, коефіцієнтом надлишку повітря і його вологості [9].

Об'ємні концентрації газоповітряної суміші і конденсату в двофазному потоці:

$$a_1 = \frac{F_1}{F}; \quad a_2 = \frac{F_2}{F}, \quad (23)$$

де a_1, a_2 – об'ємні концентрації складових двофазного потоку: газоподібної суміші і конденсату; F – загальна площа перерізу каналу; F_1 – площа перерізу каналу, що займає газоповітряна суміш; F_2 – площа перерізу каналу, що займає конденсат.

Густина складових двофазного потоку: газоповітряної суміші і конденсату:

$$\rho_1 = a_1 \cdot \rho_1^0; \quad \rho_2 = a_2 \cdot \rho_2^0, \quad (24)$$

де ρ_1^0, ρ_2^0 – справжня густина газоповітряної суміші і конденсату.

Масові витрати складових двофазного потоку на вході до ділянки конденсації:

$$M_{\text{ex1}} = \rho_1^0 \cdot w_1 \cdot F_1 = \rho_1^0 \cdot w_1 \cdot a_1 \cdot F = \rho_1 \cdot w_1 \cdot F; \quad (25)$$

$$M_{\text{ex2}} = \rho_2^0 \cdot w_2 \cdot F_2 = \rho_2^0 \cdot w_2 \cdot a_2 \cdot F = \rho_2 \cdot w_2 \cdot F, \quad (26)$$

де M_{ex1} – витрата газоподібної суміші, M_{ex2} – витрата конденсату.

Масові витрати складових двофазного потоку в кінці ділянки конденсації змінюються. Позначимо ці витрати: $M_{\text{вх1}}$, $M_{\text{вх2}}$ (індекс 1 відноситься до газоподібної суміші, індекс 2 – до конденсату).

Параметри потоку на виході також змінюються і визначаються такими виразами:

параметри газоповітряної суміші:

$$\rho_1^0 + d\rho_1^0; \quad w_1 + dw_1; \quad a_1 + da_1; \quad T_1 + dT_1; \quad (27)$$

параметри конденсату:

$$\rho_2^0 = \text{const}; \quad w_2 + dw_{21}; \quad a_2 + da_2; \quad T_2 + dT_2. \quad (28)$$

Якщо позначити об'ємну густину джерел фазового переходу, що розподілені в об'ємі каналу через m (кг/м³·с), отримаємо:

$$M_{\text{вх1}} - M_{\text{ex1}} = -mFdz; \quad (29)$$

$$M_{\text{вх2}} - M_{\text{ex2}} = mFdz. \quad (30)$$

Рівняння збереження маси:

$$\frac{1}{F} \cdot \frac{d}{dz} (\rho_1 w_1 F) = -m; \quad (31)$$

$$\frac{1}{F} \cdot \frac{d}{dz} (\rho_2 w_2 F) = m. \quad (32)$$

Рівняння руху:

$$\rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dz} = -a_1 \frac{dP}{dz} - m(w_{12} - w_1) - \frac{\lambda_1}{D} \rho_1^0 \frac{w_1^2}{2} + (\rho_a - \rho_1^0)gdh; \quad (33)$$

$$\rho_2 w_2 \frac{dw_2}{dz} = -a_2 \frac{dP}{dz} + m(w_{12} - w_2) - \frac{\lambda_2}{D} \rho_2^0 \frac{w_2^2}{2} + \rho_2^0 gdh. \quad (34)$$

Рівняння енергії:

$$\rho_1 w_1 F d \left(i_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) = -mFdz \left[i_{12} - i_1 + \frac{(w_{12}^2 - w_1^2)}{2} \right] - dQ_{1c}. \quad (35)$$

$$\rho_2 w_2 F d \left(i_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) = mFdz \left[i_{12} - i_2 + \frac{(w_{12}^2 - w_2^2)}{2} \right] + dQ_{1c} - dQ_{2c}. \quad (36)$$

$$dQ_{1c} = \pi D dz \alpha_{1c} (T - T_c); \quad (37)$$

$$dQ_{2c} = D_2 dz \alpha_{2c} (T_c - T_{wi}), \quad (38)$$

де w_{12}, i_{12} – параметри обмінної маси; dQ_{1c} – тепловий потік конвекцією між газоподібною сумішшю і конденсатом; dQ_{2c} – тепловий потік, який передається конденсатом до стінки каналу; D_2 – змочений периметр рідкої фази.

Тепловий потік через будівельну конструкцію та в опалюваний простір ділянки конденсації визначають рівняннями (14)–(17).

На основі рівнянь математичної моделі системи з трубчастими газовими нагрівачами у просторі будівельних конструкцій під час роботи в режимі конденсації можна робити розрахунки теплового і гідравлічного режимів таких систем тепlopостачання. Для

цього потрібно інтегрувати рівняння (31)–(38) за відомих початкових умов.

Початкові умови визначаються з розрахунку попередньої ділянки течії.

Висновки

Математична модель (1)–(38) гідравлічного і теплового режимів автономної системи тепlopостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях за роботи в режимі конденсації наведена у вигляді диференціальних рівнянь. В основі є рівняння збереження маси, руху та енергії для

газоповітряної суміші всередині каналу в умовах двофазного потоку, рівняння переносу тепла всередині будівельної конструкції, рівняння тепловіддачі від зовнішньої поверхні нагрівача до середовища.

Математична модель гідравлічного і теплового режимів автономної системи тепlopостачання з трубчастими газовими нагрівачами у будівельних конструкціях за роботи в режимі конденсації дозволить розраховувати і конструювати такі системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Иродов В. Ф., Ткачева В.В., Солод Л. В. Расчет температурных удлинений инфракрасного трубчатого газового обогревателя. *Theoretical Foundations of Civil Engineering: Polish–Ukrainian Transactions*. Vol. 19. Warsaw : Warsaw University of Technology, 2011. Pp. 381–386.
2. Система повітряно-променевого опалення : патент 83475 Україна (UA): МПК F24D 10/00. № 2658800430, № 1749400092, № 2819808522, № 3308901641; заявл. 03.04.2013; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 17. 4 с.
3. Иродов В. Ф., Солод Л. В., Кобыща А. В. Математическое моделирование элементарного участка системы воздушно-лучистого отопления. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2001. № 4. С. 41–46.
4. Солод Л. В. Метод розрахунку і раціональні параметри інфрачервоних трубчастих газових обігрівачів : автореф. канд. дис. : 05. 23. 03. Харків : ХДТУБА, 2011. 20 с.
5. Дудкин К., Ткачева В., Данишевский В. Расчет теплового и гидравлического режима при проектировании многоконтурных трубчатых газовых нагревателей. *Theoretical Foundations of Civil Engineering. Polish–Ukrainian transactions*. Vol. 20. Warsaw : Warsaw University of Technology, 2013. Pp. 531–536.
6. Березюк А. Г., Ткачева В. В., Иродов В. Ф. Математическое моделирование трубчатого газового нагревателя с учетом конденсации водяного пара из газозвоздушной смеси. *Naukowe prace, praktyka, obracomania, innowacje : Zbiyr raportyw naukowych*. Zakopane : Diamond Trading Tour Publ., 2013. Pp. 7–13.
7. Березюк Г. Г., Иродов В. Ф. Математичне моделювання ділянки трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. Вип. 5. С. 6–9.
8. Чорноморець Г. Я., Иродов В. Ф. Математичне моделювання трубчастих газових нагрівачів, розташованих у будівельних конструкціях. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2012. Вип. 68. С. 395–399.
9. Костюк О. П. Паливо та обладнання для його спалювання : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2011. 121 с.

REFERENCES

1. Irodov V.F., Tkacheva V.V. and Solod L.V. *Raschet temperaturnykh udlinenij infrakrasnogo trubchatogo gazovogo obogrevatelya* [Calculation of temperature elongations of the infrared tube gas heater]. *Theoretical Foundations of Civil Engineering: Polish–Ukrainian transactions (conference)*. Warsaw : Warsaw University of Technology, 2011, no. 19, pp. 381–386. (in Russian).
2. *Sistema povitryano-promenevogo opalennya* [Air-beam heating system]. Ukrainian Patent, no. 83475 (UA): IPC F24D 10/00, no. 2658800430, no. 1749400092, no. 2819808522, no. 3308901641; statement 04.03.2013; published 10.09.2013. Bul. no. 17, 2013, 4 p. (in Ukrainian).
3. Yrodov V.F., Solod L.V. and Kobyschcha A.V. *Matematycheskoe modelyrovanye elementarnoho uchastka systemy vozdušno-luchystoho otopeniya* [Mathematical modelling of an elementary section of an air-radiant heating system]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnystva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2001, no. 4, pp. 41–46. (in Russian).
4. Solod L.V. *Metod rozrakhunku i ratsional'ni parametry infrachervonykh trubchastykh hazovykh obihrivachiv : avtoref. kand. dys.* [Calculation method and rational parameters of infrared tubular gas heaters. Extended abstract of candidate's thesis]. Kharkiv : KhDTUBA Publ., 2011, 20 p. (in Ukrainian).
5. Dudkyn K., Tkacheva V. and Danyshevskiy V. *Raschet teplovogo i gidravlicheskogo rezhima pri proektirovanii mnogokonturnykh trubchatykh gazovykh nagrevatelej* [Calculation of thermal and hydraulic conditions in

the design of multi-circuit tubular gas heaters]. Theoretical Foundations of Civil Engineering : Polish-Ukrainian transactions (conference). Warsaw : Warsaw University of Technology, 2013, no. 20, pp. 531–526. (in Russian).

6. Berezjuk A.G., Tkachova V.V. and Irodov V.F. *Matematicheskoe modelirovanie trubchatogo gazovogo nagrevatelja s uchetom kondensacii vodjanogo para iz gazovozdushnoj smesi* [Mathematical modeling of the tubular gas heater based on the condensation of water vapor from the gas concoction]. Naykove Prace, Praktyka, Obracomania, Innowacje : zbiur raportuw naukowych. Zakopane : Diamond Trading Tour Publ., 2013, pp. 7–13. (in Russian).

7. Berezjuk H.H. and Irodov V.F. *Matematychni modelyuvannya dilyanky trubchastoho hazovoho nahrivacha u kondensatsiynomu rezhymi roboty* [Mathematical modeling of the area of tubular gas heater in the condensing mode of work]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, iss. 5, pp. 6–9. (in Ukrainian).

8. Chornomorets H.Ya. and Irodov V.F. *Matematychni modeliuvannia trubchastykh hazovykh nahrivachiv, roztashovanykh u budivelnykh konstruktsiakh* [Mathematical modeling tube gas heaters located in building structures]. *Naukovyj visnyk budivnytstva : zb. nauk. prats* [Scientific Bulletin construction : coll. sc. works]. 2012, iss. 68, pp. 395–399. (in Ukrainian).

9. Kostiuk O.P. *Palyvo ta obladnannya dlya yoho spalyuvannya : navch. posib.* [Fuel and equipment for burning it : training manual]. 2011, Rivne : NUVHP Publ., 2011, 121 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.03.2024.

УДК 002:005.5+349.2:651.5

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.72.1045

ЗМІНИ У ПРАВОВОМУ ПОЛІ КАДРОВОГО ДІЛОВОДСТВА В СУЧАСНИХ УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ

ПРОКОФ'ЄВА К. А.^{1*}, *канд. філол. наук, доц.*,
РЕШЕТИЛОВА О. М.², *канд. пед. наук, доц.*

^{1*} Кафедра документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій», пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (095) 760-79-90, e-mail: canopa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4242-3346

² Кафедра документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій», пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (097) 585-08-23, e-mail: karunga@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7975-0773

Анотація. Для ефективного розвитку будь-якого підприємства, організації або установи ключовим аспектом є організація роботи з документами, зокрема, з кадровою документацією. Кадрова документація включає в себе різноманітні документи, що містять інформацію про персонал, такі як заяви про прийняття, звільнення, переведення на іншу посаду, накази, автобіографії, характеристики, контракти та трудові угоди, що фіксуються у трудових книжках. Відділ кадрів відповідає за підготовку та оформлення цих документів і вважається обов'язковим і важливим структурним підрозділом будь-якої організації. Облік персоналу проводиться на всіх підприємствах та установах, що мають право самостійно приймати, переводити, звільняти працівників, заохочувати їх та представляти до державного нагороджування, а також встановлювати власні правила внутрішнього розпорядку та умови праці. Практично на кожному підприємстві оформляються документи, пов'язані з кадровою роботою. Якість документування і його оперативність значно впливають на те, наскільки ефективно ведеться робота з цими документами. Сам процес роботи з кадровою документацією і є суттєвою складовою кадрового діловодства. Визначальним фактором успіху взаємовідносин і дотримання рівноваги інтересів працівників і роботодавців стало розроблення та введення необхідної організаційно-правової документної бази, що забезпечить хід трудового процесу відповідно до норм чинного законодавства. Також дотримання ключових заходів кадрової роботи гарантує керування трудовими ресурсами відповідно до етичних норм. Це забезпечить цивілізоване розв'язання проблем та суперечностей, що можуть виникнути між суб'єктами трудових відносин. Адже навантаження на трудове законодавство та кадровий менеджмент значно збільшується й вимагає пристосування до нових реалій в сучасних умовах воєнного стану.

Ключові слова: законодавство України; трудове право; кадровий менеджмент; управління персоналом; діловодство; трудові відносини; воєнний стан

CHANGES IN THE LEGAL FIELD OF PERSONNEL MANAGEMENT IN THE CURRENT CONDITIONS OF MARITAL STATE IN UKRAINE

PROKOFIEVA K.A.^{1*}, *Cand. Sc. (Phil.), Assoc. Prof.*,
RESHETILOVA O.M.², *Cand. Sc. (Phil.), 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 Technology, 4, Naharin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (095) 760-79-90, e-mail: canopa@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4242-3346

² Department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI "Institute of Industrial and Business Technologies" of the Ukrainian State University of Science and Technology, 4, Naharin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (097) 585-08-23, e-mail: karunga@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7975-0773

Abstract. For the effective development of any enterprise, organization or institution, a key aspect is the organization of work with documents, in particular with personnel documentation. Personnel documentation includes a variety of documents containing information about personnel, such as applications for acceptance, dismissal, transfer to another position, orders, autobiographies, characteristics, contracts and employment agreements recorded in labor books. The personnel department is responsible for the preparation and execution of these documents and is considered a mandatory and important structural unit of any organization. Personnel accounting is carried out at all enterprises and institutions that have the right to independently hire and fire employees, transfer them or reward them, as well as establish their own internal rules and working conditions. Documents related to personnel work are drawn up at almost

every enterprise. The quality of documentation and its efficiency significantly affect how effectively work with these documents is conducted. The very process of working with personnel documentation is an essential component of personnel administration. The determining factor in the success of mutual relations and maintaining the balance of the interests of employees and employers is the development and introduction of the necessary organizational and legal document base, which will ensure the progress of the labor process in accordance with the norms of current legislation. Compliance with key measures of personnel work guarantees the management of labor resources in accordance with ethical norms also. This will ensure a civilized resolution of problems and conflicts that may arise between subjects of labor relations. After all, the burden on labor legislation and personnel management is significantly increasing and requires adaptation to new realities in modern conditions of martial law.

Keywords: *legislation of Ukraine; labor law; personnel management; record keeping; labor relations; martial state*

Постановка проблеми. Облік персоналу проводиться на всіх підприємствах та установах, що мають право самостійно приймати, переводити, звільняти працівників, заохочувати їх та представляти до державного нагороджування, а також встановлювати власні правила внутрішнього розпорядку та умови праці. Практично на кожному підприємстві оформляються документи, пов'язані з кадровою роботою. Якість документування і його оперативність значно впливають на те, наскільки ефективно ведеться робота з цими документами. Сам процес роботи з кадровою документацією і є суттєвою складовою кадрового діловодства.

У переліку основних нормативно-правових актів, які регулюють кадрове діловодство, важливо виокремити такі документи:

– Закон України «Про Національний архівний фонд та архівні установи» від 24 грудня 1993 року № 3814-ХІІ;

– Правила № 1000/5 та Типова інструкція з діловодства в міністерствах, інших центральних та місцевих органах виконавчої влади, затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 17 січня 2018 року № 55;

– Національний стандарт України «Державна уніфікована система документації. Уніфікована система організаційно-розпорядчої документації. Вимоги до оформлення документів» (ДСТУ 4163-2020) та Інструкція № 58;

– «Перелік типових документів, що створюються під час діяльності державних органів та органів місцевого самоврядування, інших установ,

підприємств та організацій», затверджений наказом Міністерства юстиції України від 12 квітня 2012 року № 578/5;

– комплексні підручники та галузеві випуски Державного класифікатора професій (ДКХП), зокрема Випуск 1 «Професії працівників, що є загальними для всіх видів економічної діяльності», який включає кваліфікаційні характеристики для посад, таких як начальник відділу кадрів, менеджер з персоналу, інспектор з кадрів;

– міжгалузеві нормативи чисельності працівників, що займаються добором, розстановкою, підвищенням кваліфікації (перепідготовкою) та обліком кадрів, затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 18 грудня 2003 року № 341;

– «Державний класифікатор управлінської документації» (ДК 010-98), затверджений наказом Державного комітету України по стандартизації, метрології та сертифікації від 31 грудня 1998 року № 1024 (зі змінами).

– інструкції з діловодства в окремих галузях, наприклад, «Інструкція з діловодства у Міністерстві охорони здоров'я України», затверджена наказом Міністерства охорони здоров'я України від 25 лютого 2014 року № 143;

– «Збірник уніфікованих форм організаційно-розпорядчих документів», схвалений протоколом засідання Методичної комісії Державного комітету архівів України від 20 червня 2006 року № 3 (має рекомендаційний характер).

Особливості організації кадрового діловодства в діючих умовах воєнного стану детерміновані Законом України «Про

організацію трудових відносин в умовах воєнного стану» від 15 березня 2022 року № 2136-IX, який набув чинності 24 березня 2022 року [32].

З урахуванням того, що в період війни виникають нові та складні ситуації, з якими роботодавці зустрічаються вперше, Міністерство економіки України у березні 2022 року надало низку роз'яснень щодо порядку дій роботодавців під час воєнного стану. Однак у роботодавців може виникати багато питань стосовно конкретного застосування цих вимог на практиці. Зокрема йдеться про забезпечення прав працівників, здійснення достойменного обліку та додержання вимог законодавства під час дії воєнного стану. У зв'язку з цим чимало практичних питань часто-густо виникають у працівників відділу кадрів під час воєнного стану.

Аналіз праць, в яких сформовано розв'язання заявленої проблеми. Деякі аспекти зазначених питань (кадрового забезпечення та кадрового діловодства) вивчались у наукових працях попередніх років вітчизняними вченими, серед яких А. В. Андрєєв [1], А. О. Мороз [23], А. В. Бабінська [2], Т. І. Балановська, М. В. Михайліченко, А. В. Троян [3], С. М. Бортник, К. Ю. Мельник, Л. В. Могілевський [4], Р. Я. Бутинська [5], Я. В. Качан [15], С. Г. Гаспарян [6;7], В. Ю. Грігчина [8], Л. Є. Довгань, Л. Л. Ведута, Г. А. Мохонько [9], І. В. Довжик [10], П. В. Євдокимов [11], В. О. Зозуля [12; 13], С. А. Капелюшний [14], Ю. О. Коваленко [16], П. О. Комірчий [18], В. В. Короленко, Т. П. Юрочко [19], А. Ю. Коротких [20] та інші науковці [21; 22; 24; 25; 27–30; 33; 34].

Законодавчі видозміни кадрової роботи, спричинені саме воєнним станом, вже стали предметом розгляду у розвідках В. О. Тур, В. О. Тура, В. І. Тюхи та О. М. Решетілової і А. О. Соломчак [31; 26]. Напрацювання з окресленої проблематики цих та інших дослідників становитимуть теоретичне підґрунтя для дослідження змін у кадровому законодавстві та кадровому діловодстві, спричинених воєнним станом, що стало

питанням, яке потребує продовження наукового осмислення.

Мета статті – з'ясувати, з огляду на зазначене, взаємодію деяких змін у трудовому законодавстві, кадрового адміністрування та діловодства організацій в сучасних українських умовах воєнного стану.

Виклад основного матеріалу. 15 березня 2022 року Верховна Рада України прийняла закон «Про організацію трудових відносин в умовах воєнного стану» [32]. Згідно з ним відбулися деякі зміни у кадровій роботі всіх без винятку установ, підприємств та організацій нашої держави. Так, у разі дії воєнного стану і порушення вимог деяких нормативно-правових актів сфери діловодства, контролюючі органи можуть залишити без застосування штрафні санкції. Проте обов'язки та завдання інспекторів із кадрів залишаються незмінними, і вони можуть виконувати їх у дистанційному режимі.

У контексті воєнного стану, деякі завдання й обов'язки кадрового діловодства можуть бути доручені працівникам інших професійних категорій за суміщенням або сумісництвом згідно із законодавством. Також може змінитися формат роботи, де частіше використовується електронна документація без додаткового роздруку.

Важливо зазначити, що під час воєнного стану не вносилися зміни до Колективного договору та Довідника кваліфікаційних характеристик посад (ДКХП). Назви посад у документах кадрового характеру мають відповідати «довоєнній версії» КП. Наприклад, зразок наказу Міністерства здоров'я України вказує на важливі зміни до ДКХП у зв'язку з політичною ситуацією, зокрема, вимагає знання державної мови та використання її під час виконання службових обов'язків. Це свідчить, що під час воєнного стану може відбуватися адаптація документів та вимог у сфері кадрового діловодства залежно від специфіки ситуації.

У веденні кадрового діловодства слід керуватись такими нормативними документами: Кодекс Законів про працю

України № 322-VIII від 10.12.1971 (визначає основні принципи та норми, що регулюють трудові відносини, права та обов'язки працівників і роботодавців) [17]; Закон України «Про оплату праці» № 108/95-ВР від 24.03.1995 (встановлює правові засади оплати праці, включаючи порядок визначення розмірів заробітної плати та гарантії її виплати); Закон України «Про відпустки» № 504/96-ВР від 15.11.1996 (визначає порядок надання та обліку відпусток для працівників); Класифікатор професій ДК 003:2010 (встановлює стандартні класифікації професій для ведення обліку кадрів та визначення кваліфікаційних характеристик працівників); Наказ Міністерства праці України, Міністерства юстиції України, Міністерства соціального захисту населення України «Про затвердження Інструкції про порядок ведення трудових книжок працівників» від 29.07.1993 № 58 (встановлює правила ведення трудових книжок працівників); Наказ Мінсоцполітики від 29.12.2004 № 336 «Про затвердження Випуску 1 «Професії працівників, які є загальними для всіх видів економічної діяльності»; Довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників» (містить інформацію про професії, що є загальними для різних видів економічної діяльності).

Ці документи надають законодавчий фундамент для організації та ведення кадрового обліку та діловодства на підприємстві відповідно до вимог законодавства України.

Згідно із Законом України № 1217-IX від 05.02.2021 «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо обліку трудової діяльності працівника в електронній формі», який набрав чинності з 10.06.2021, роботодавці звільняються від обов'язку ведення паперових трудових книжок. Замість цього буде впроваджено електронний облік трудової діяльності в Державному реєстрі загальнообов'язкового державного соціального страхування.

Основні аспекти цих змін такі:

1) скасування паперових трудових книжок (Закон визначає, що роботодавець може вести електронний облік трудової діяльності працівника через Державний реєстр загальнообов'язкового державного соціального страхування);

2) ведення обліку в електронній формі (прийняття на роботу, переведення, звільнення, заохочення та нагородження вноситимуться в електронну трудову книжку в Державному реєстрі);

3) п'ятирічний перехідний період (протягом якого паралельно існуватимуть паперові й електронні варіанти трудових книжок).

Відповідно до Закону № 2136, у період дії воєнного стану в Україні виникають певні особливості та альтернативи в організації кадрового діловодства та обробці документів. Декілька ключових пунктів тут слід враховувати, а саме:

1) організація діловодства в зонах активних бойових дій (роботодавець має право самостійно встановлювати порядок організації та ведення діловодства з питань трудових відносин. Важливо забезпечити достовірний облік виконуваної праці та оплату праці);

2) альтернативні способи створення та зберігання документів (сторони трудового договору можуть узгоджувати альтернативні способи роботи з документами щодо трудових відносин). Це може включати будь-який інший доступний спосіб електронної комунікації між роботодавцем і працівником;

3) застосування «Інструкції з діловодства» (у зв'язку з цими змінами роботодавець може вирішити розробити власну інструкцію з діловодства, яка враховує специфіку кадрового діловодства та інші способи роботи з кадровою документацією під час воєнного стану).

Ці заходи спрямовані на забезпечення продовження діяльності та ведення обліку трудової діяльності в умовах воєнного стану, зберігаючи при цьому ефективність та достовірність даних.

Згідно з викладеним, Закон № 2352 та інші нормативно-правові акти, введені під

час дії воєнного стану в Україні, викликали зміни у трудовому законодавстві.

Нижче розглянуто ключові аспекти, які можуть впливати на кадрове діловодство та оформлення документів:

– інформування працівників про вакансії (згідно зі ст. 23 Кодексу законів про працю України (КЗпП), роботодавець повинен інформувати працівників, що працюють за строковим трудовим договором, про актуальні вакансії, для можливості укладання безстрокового трудового договору. Інформування може проводитися різними способами, включаючи електронні повідомлення, оголошення на підприємстві тощо);

– інформування перед укладанням трудового договору (Ст. 29 КЗпП визначає перелік інформації, яку роботодавець зобов'язаний узгоджено з працівником надати до початку роботи. Це стосується різних аспектів трудового договору та умов праці);

– дистанційна робота (у разі укладання трудового договору про дистанційну роботу виникають нові вимоги, зокрема, обов'язок проведення систематичного інструктажу або навчання працівника з питань охорони праці) та протипожежної безпеки. Ці інструктажі дозволяється проводити дистанційно);

– письмове повідомлення при звільненні (згідно зі змінами, внесеними у законодавство, вкупі з копією наказу про звільнення роботодавець має видати працівникові письмове повідомлення про нарахування й виплату йому всіх грошей, що той одержує у разі звільнення);

– альтернативні способи створення та зберігання документів (законодавчі зміни передбачають, що роботодавець та працівник можуть узгоджувати альтернативні способи створення, пересилання та зберігання документів, включаючи електронні засоби комунікації).

Всі ці зміни зумовлюють необхідність адаптації процедур обліку трудової діяльності та організації кадрового діловодства відповідно до нових вимог законодавства. Розробка чіткої інструкції з

діловодства на підприємстві може сприяти ефективній роботі та відповідності всім нормативам.

Такі зміни у порядку та підставах звільнення працівників вимагають внесення відповідних змін у шаблони наказів із кадрових питань та уваги під час оформлення записів у трудових книжках. Для коректного застосування підстав для звільнення працівників можна вжити таких заходів:

– аналіз шаблонів наказів (переглянути існуючі шаблони наказів із кадрових питань та переконатися, що вони відповідають новому порядку та підставам звільнення, внести необхідні зміни у текст наказів для відображення актуальної інформації);

– навчання кадрового персоналу (забезпечення навчання кадрового персоналу з нових підстав та порядку звільнення. Вони повинні бути ознайомлені зі змінами та здатні правильно застосовувати їх для видачі наказів);

– оновлення внутрішніх документів (переглянути і оновити внутрішні документи та інструкції, які регулюють процеси кадрового діловодства та звільнення, забезпечити їх відповідність актуальному законодавству);

– підготовка записів у трудові книжки (при оформленні записів у трудових книжках звернути увагу на правильність відображення нових підстав та порядок звільнення, запевнитись, що всі необхідні документи та підписи присутні);

– консультація з юристом (для впевненості в коректності проведених змін та дотриманні законодавчих вимог краще звертатися до юриста чи фахівця з трудового права);

– оголошення та надання інформації працівникам (забезпечити ефективний механізм оголошень і надання інформації працівникам щодо змін у порядку та підставах звільнення. Це допоможе уникнути непорозумінь та питань від працівників).

Ретельно розглядаючи всі аспекти, пов'язані зі змінами у кадровому діловодстві, можна забезпечити

відповідність внутрішніх документів актуальному законодавству для дотримання юридичної правомірності та ефективності управління персоналом. Наприклад, ст. 36 КЗпП доповнена новими пунктами та підпунктами:

8¹) смерть роботодавця – фізичної особи або набрання законної сили рішенням суду про визнання такої фізичної особи безвісно відсутньою чи про оголошення її померлою;

8²) смерть працівника, визнання його судом безвісно відсутнім або оголошення померлим;

8³) відсутність працівника на роботі та інформації про причини такої відсутності понад чотири місяці поспіль [17].

Ці доповнення вирішують юридичну колізію, що виникає у процесі визначення правових підстав припинення дії трудового договору у зв'язку із смертю, визнанням безвісти зниклим або оголошенням померлим працівника або роботодавця – фізичної особи, зокрема, фізичної особи підприємця (ФОП). Також пункт 8³ не можна вважати ідентичним зі звільненням у зв'язку з прогулом (пункт 4 статті 40 Кодексу законів про працю). Для використання пункту 8³ обов'язкове одночасне виконання двох умов:

– фактична відсутність працівника на робочому місці протягом більше чотирьох місяців поспіль;

– відсутність чи брак інформації у роботодавця про причину відсутності працівника протягом більше ніж чотири місяці поспіль (без значення, чи існує обґрунтована причина для цієї відсутності).

Зазначені зміни в трудовому законодавстві України впливають на процес звільнення працівників та визначають нові підстави для припинення трудових відносин. Щоб дотриматися цих змін і уникнути можливих юридичних питань, роботодавцям слід враховувати такі аспекти:

– узгодження шаблонів наказів (шаблони наказів із кадрових питань оновлюються, враховуючи нові підстави для звільнення, щоб текст наказів відображав усі необхідні умови та обставини);

– навчання кадрового персоналу (забезпечення навчання кадрового персоналу зі змінами у трудовому законодавстві. Вони повинні бути компетентні в розумінні нових правил та підходів до припинення трудових відносин);

– оповіщення працівників (забезпечення однозначного та своєчасного інформування працівників про будь-які зміни в умовах звільнення, нові підстави та їх права відповідно до законодавства);

– збереження контактів працівників (зберігання актуальних контактних даних звільнених працівників протягом року, якщо передбачається можливість поворотного прийняття на роботу. Це може бути корисно у разі поновлення діяльності підприємства);

– виплата вихідної допомоги (дотримання вимог законодавства щодо виплати вихідної допомоги в разі розірвання трудового договору за новими підставами);

– залучення юридичних консультантів (важливо мати юридичних консультантів або фахівців із трудового права для забезпечення правомірності та коректності всіх процедур звільнення);

– дотримання нових вимог (вивчення нових вимог та правил законодавства та впровадження їх у внутрішній документації підприємства).

Враховуючи ці аспекти, роботодавці можуть забезпечити відповідність своєї діяльності актуальним законодавством та уникнути можливих проблем у сфері кадрового управління.

Згідно з положеннями статті 49² КЗпП, передбачено особливий порядок звільнення працівників у зв'язку з неможливістю забезпечити їх роботою. Цей спеціальний порядок включає такі кроки:

1) особисте попередження працівника не менше ніж за 10 календарних днів;

2) повідомлення про звільнення, що планується, профспілки, включаючи причини звільнення, кількість та категорії працівників, яких це може стосуватися, терміни проведення звільнення, не пізніше як за 10 календарних днів;

3) надання інформації державній службі зайнятості про вивільнення працівників, що

планується, та проведення протягом наступних п'яти календарних днів консультацій із профспілками заходів щодо запобігання звільненням [17].

Виправлення та збереження достовірності обліку робочого часу стало важливим завданням під час призупинення трудового договору у воєнний період. Умовні позначення для табелювання – «ІН», «ІВ», «І», відображають інші неявки та види неявок, які можуть виникнути під час призупинення трудового договору. Дотримання цих позначень дозволяє чітко вказати призупинений період та підготувати облік для подальшого відновлення роботи.

Щодо подання звітності про кадри в умовах воєнного стану, важливо стежити за вимогами законодавства та директивами, які можуть бути встановлені у цей період. Зауважимо, що призупинення трудового договору – це тимчасове явище пов'язане зі збройною агресією проти України, що є винятковою ситуацією. У таких обставинах дотримання усіх встановлених норм та процедур особливо важливе.

Роботодавцям слід уважно стежити за оновленнями законодавства, щоб своєчасно реагувати на будь-які зміни та забезпечувати відповідність своєї діяльності законодавчим вимогам. Також може бути корисним звертатися до юридичних консультантів або фахівців із трудового права для отримання конкретних порад та підтримки у справах, пов'язаних зі змінами у трудовому законодавстві та кадровому управлінні.

Додатково зазначимо, що призупинення трудового договору не застосовується до таких категорій працівників:

- 1) керівники та заступники керівників державних органів;
- 2) посадовці місцевого самоврядування на виборних посадах.

Процедура призупинення оформляється наказом роботодавця. Якщо працівник/ки не погоджується із наказом про призупинення, оскарження може бути подане до Держпраці України або її територіального органу. Після вивчення змісту наказу та підстав для його видання, Держпраця України або її

територіальний орган може внести припис роботодавцеві щодо скасування наказу або усунення порушення законодавства про працю.

Роботодавець зобов'язаний виконати припис протягом 14 календарних днів із дня його отримання. Якщо роботодавець не погоджується із приписом Держпраці України або її територіального органу, він може оскаржити його у судовому порядку протягом 10 календарних днів. Ці процедури та терміни важливі для забезпечення законності та справедливості у вирішенні питань, пов'язаних із призупиненням трудового договору в умовах воєнного стану.

Висновки

Кадровий менеджмент – це надважливий аспект управління трудовими ресурсами. Невипадково держава виробила сталий набір правил і процедур, які ретельно деталізують засоби здійснення керівництвом і менеджерами будь-яких актів щодо найманих працівників.

Розроблення та ведення кадрового діловодства стали обов'язковим напрямом роботи усіх без винятку підприємств, незалежно від форми власності. Навіть у мирний час кадрове діловодство, хоч достатньо зрозуміле та передбачуване, – це трудомісткий процес, що потребує попередніх знань та навичок. А із прийняттям та впровадженням у дію Закону України «Про організацію трудових відносин в умовах воєнного стану» державна кадрова політика загалом, управління особовим складом підприємств і кадрове діловодство зокрема, зазнали суттєвих змін. Вони стосуються як оформлення та обміну кадровими документами (подання заяв роботодавцю, ознайомлення з наказами працівників), так і здійснення комунікацій між установами, підприємствами, організаціями з одного боку та працівниками з іншого.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрєєв А. В. Проблеми правового регулювання кадрового забезпечення державної служби України : дис. ... д-ра юрид. наук : 12.00.05. Київ, 2019. 417 с.
2. Бабінська А. В. Принципи кадрового забезпечення органів прокуратури. *Прикарпатський юридичний вісник*. 2019. Т. 2, № 3 (28). С. 13–19.
3. Балановська Т. І., Михайліченко М. В., Троян А. В. Сучасні технології управління персоналом : навч. посіб. Київ : ФОП Ямчинський О. В., 2020. 466 с.
4. Бортник С. М., Мельник К. Ю., Могілевський Л. В. Трудове право України : підруч. МВС України, Харків. нац. у-нт внутр. справ. Харків, 2019. 408 с.
5. Бутинська Р. Я. Правовий статус учасників колективно-трудова праввідносин : моногр. Львів : Вид-во «Растр-7», 2020. 234 с.
6. Гаспарян С. Г. Адміністративно-правові засади кадрового забезпечення судово-експертних установ України : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07. Харків, 2019. 217 с.
7. Гаспарян С. Г. Система принципів кадрового забезпечення експертних установ України. *Прикарпатський юридичний вісник*. 2018. № 4 (25), т. 2. С. 8–11.
8. Грітчина В. Ю. Адміністративно-правове забезпечення кадрових процедур в Національній поліції України : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07. Київ, 2017. 199 с.
9. Довгань Л. Є., Ведута Л. Л., Мохонько Г. А. Технології управління людськими ресурсами : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 512 с.
10. Довжук І. В. Діловодство (загальне, спеціальне) : навч.-метод. посіб. Переяслав : Домбровська Я. М., 2020. 353 с.
11. Євдокимов П. В. Адміністративно-правове регулювання реалізації кадрового забезпечення в органах публічної адміністрації в Україні : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07. Запоріжжя, 2020. 237 с.
12. Зозуля В. О. Ефективне кадрове забезпечення – складова демократичного врядування. *Державно-управлінські студії*. 2017. № 2. С. 1–3.
13. Зозуля В. О. Принципи кадрового забезпечення органів державної влади за демократичного врядування. *Економіка та держава. Сер. : Державне управління*. 2017. № 2. С. 38–40.
14. Капелюшний С. А. Сутність та значення професійного розвитку молодшого керівного складу у формуванні системи кадрового забезпечення Національної гвардії України. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2019. № 3. С. 231–238.
15. Качан Я. В. Поняття кадрового забезпечення публічної служби в Україні. *Вісник Національного університету цивільного захисту України. Серія : Державне управління*. 2019. Вип. 2 (11). С. 295–303.
16. Коваленко Ю. О. Адміністративно-правовий механізм інформаційного забезпечення протидії корупції в правоохоронних органах України : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07. Київ, 2018. 239 с.
17. Кодекс законів про працю України: від 10.12.1971 № 322-VIII. Дата оновлення: 19.08.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08#Text> (дата звернення: 05.12.2023).
18. Комірчий П. О. Кадрове забезпечення публічної служби у правоохоронній сфері : поняття та правові вимоги. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія : Юриспруденція*. 2019. № 41, т. 2. С. 134–137.
19. Короленко В. В., Юрочко Т. П. Кадрова політика у сфері охорони здоров'я України в контексті європейської інтеграції : монографія. Київ : КІМ, 2018. 102 с.
20. Коротких А. Ю. Проблеми юридичної відповідальності державних службовців за трудовим законодавством України : дис. ... д-ра юрид. наук : 12.00.05. Київ, 2019. 472 с.
21. Кравченко І. С. Правові засади реалізації кадрової політики Національної поліції України. *Підприємництво, господарство і право*. 2018. № 2. С. 68–72.
22. Любимов О. К. Гарантії службово-трудова діяльності професійного публічного службовця. *Науковий вісник публічного та приватного права*. 2020. Вип. 1. С. 105–110.
23. Мороз А. О. Вплив системи кадрового забезпечення на формування лідерів «нової генерації». *Організаційно-управлінські та психологічні аспекти сучасного ринку праці України : тези доп. VIII Всеукр. наук.-практ. конф. молод. учен.* (Київ, 29 жовтня 2019 р.). Київ, 2019. С. 126–129.
24. Перов А. П. Адміністративно-правові засади професійного навчання державних службовців України : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07. Київ, 2020. 235 с.
25. Попик А. В. Адміністративно-правові засади реалізації кадрової політики в системі правосуддя : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07. Київ, 2020. 238 с.
26. Решетілова О. М., Соломчак А. О. Законодавчі зміни у кадровому діловодстві в умовах воєнного стану. *Вчені записки кафедри документознавства та інформаційної діяльності (КДІД): зб. наук. праць*. Вип. 5. Ред. кол.: О. В. Михайлюк (голова ред. кол.) та ін. Дніпро : УДУНТ, 2023. С. 66–71.
27. Ромашов Ю. С. Принципи публічного адміністрування кадрового забезпечення Національної поліції України. *Актуальні проблеми вітчизняної юриспруденції*. 2019. № 6. С. 100–103.
28. Тарнавський М. І. Економічне оцінювання та побудова органів управління персоналом підприємств : дис. ... канд. екон. наук : 08.00.04. Львів, 2018. 233 с.
29. Тетера В. М. Адміністративно-правові засади кадрового забезпечення Національної поліції України на регіональному рівні : автореф. дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07. Київ, 2018. 22 с.

30. Тимошенко В. О. Адміністративно-правові засади кадрового забезпечення діяльності Державного бюро розслідувань : дис. ... канд. юрид. наук :12.00.07. Київ, 2020. 235 с.
31. Тур О. В., Тур О. В., Тюха В. І. Вплив трудового законодавства на кадрове адміністрування та діловодство в організації. *Економіка та суспільство*. 2022. № 45. С. 45–56.
32. Україна. Верховна Рада. Про організацію трудових відносин в умовах воєнного стану : Закон України від 15.03.2022 р. № 2136- IX. Верховна Рада України. Законодавство України : [офіц. портал]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2136-20#Text>
33. Шаповал О. А., Котенок С. Б. Теоретико-методичні засади управління кадровим забезпеченням підприємства. *Держава та регіони. Серія : Економіка та підприємництво*. 2019. № 4. С. 134–137.
34. Щьокіна Є. Ю., Дорофєєва І. С. Кадрове забезпечення як складова інноваційного розвитку регіону. *Приазовський економічний вісник*. 2019. Вип. 6 (17). С. 246–250.

REFERENCES

1. Andriev A.V. *Problemy pravovoho rehulyuvannya kadrovoho zabezpechennya derzhavnoyi sluzhby Ukrainy* [Problems of legal regulation of personnel provision of the civil service of Ukraine]. Dis. ... Dr. Sc. (Low) : 12.00.05. Kyiv, 2019, 417 p. (in Ukrainian).
2. Babinska A.V. *Pryntsypy kadrovoho zabezpechennya orhaniv prokuratury* [Principles of staffing of prosecutor's offices]. *Prykarpatskyi yurydychnyi visnyk* [Carpathian Legal Gazette]. 2019, vol. 2, no. 3 (28), pp. 13–19. (in Ukrainian).
3. Balanovska T.I., Mykhaïlichenko M.V. and Troian A.V. *Suchasni tekhnolohiyi upravlinnya personalom : navch. posib.* [Modern technologies of personnel management : tutorial]. Kyiv : FOP Yamchynskiy O.V., 2020, 466 p. (in Ukrainian).
4. Bortnyk S.M., Melnyk K.Yu. and Mohilevskiy L.V. *Trudove pravo Ukrainy : pidruch.* [Labor law of Ukraine : textbook]. Kharkiv : MVS Ukrainy, Kharkiv. nats. u-nutn. sprav, 2019, 408 p. (in Ukrainian).
5. Butynska R.Ya. *Pravovyy status uchastnykiv kolektivno-trudovykh pravovidnosyn* [Legal status of participants in collective labor relations : monohr.]. Lviv : “Rastr-7” Publ., 2020, 234 p. (in Ukrainian).
6. Hasparian S.H. *Administratyvno-pravovi zasady kadrovoho zabezpechennya sudovo-ekspertnykh ustanov Ukrainy* [Administrative and legal principles of personnel support of forensic institutions of Ukraine]. Dis. ... Cand. Sc. (Low) : 12.00.07. Kharkiv, 2019, 217 p. (in Ukrainian).
7. Hasparian S.H. *Systema pryntsyypiv kadrovoho zabezpechennya ekspertnykh ustanov Ukrainy* [System of principles of staffing of expert institutions of Ukraine]. *Prykarpatskyi yurydychnyi visnyk* [Carpathian Legal Gazette]. 2018, no. 4 (25), vol. 2, pp. 8–11. (in Ukrainian).
8. Hritchina V.Yu. *Administratyvno-pravove zabezpechennia kadrovyykh protsedur v Natsionalnii politsii Ukrainy* [Administrative and legal support of personnel procedures in the National Police of Ukraine]. Dis. ... Cand. Sc. (Low) : 12.00.07. Kyiv, 2017, 199 p. (in Ukrainian).
9. Dovhan L.Ye., Veduta L.L. and Mokhonko H.A. *Tekhnolohii upravlinnia liudskymy resursamy : navch. posib.* [Human resource management technologies : tutorial]. Kyiv : KPI named Ihor Sikorskyi Publ., 2018, 512 p. (in Ukrainian).
10. Dovzhuk I.V. *Dilovodstvo (zahalne, spetsialne) : navch.-metod. posib* [Clerkship (general, special) : teaching-method. manual]. Pereiaslav, Kyiv. reg : Dombrovska Ya.M. Publ., 2020, 353 p. (in Ukrainian).
11. Yevdokymov P.V. *Administratyvno-pravove rehuliuвання realizatsii kadrovoho zabezpechennia v orhanakh publichnoi administratsii v Ukraini* [Administrative and legal regulation of the implementation of staff support in public administration bodies in Ukraine]. Dis. ... Cand. Sc. (Low) : 12.00.07. Zaporizhzhia, 2020, 237 p. (in Ukrainian).
12. Zozulia V.O. *Efektivne kadrove zabezpechennia – skladova demokratychnoho vriaduvannia* [Effective staffing is a component of democratic governance]. *Derzhavno-upravlinnski studii* [Public Administration Studies]. 2017, no. 2, pp. 1–3. (in Ukrainian).
13. Zozulia V.O. *Pryntsypy kadrovoho zabezpechennia orhaniv derzhavnoi vlady za demokratychnoho vriaduvannia* [Principles of staffing of state authorities under democratic governance]. *Ekonomika ta derzhava. Ser. : Derzhavne upravlinnia* [Economy and the State. Ser. : Governance]. 2017, no. 2, pp. 38–40. (in Ukrainian).
14. Kapeliushnyi S.A. *Sutnist ta znachennia profesiinoho rozvytku molodshoho kerivnogo skladu u formuvanni systemy kadrovoho zabezpechennia Natsionalnoi hvardii Ukrainy* [The essence and significance of the professional development of junior management in the formation of the personnel support system of the National Guard of Ukraine]. *Publichne upravlinnia ta mytne administruvannia* [Public Administration and Customs Administration]. 2019, no. 3, pp. 231–238. (in Ukrainian).
15. Kachan Ya.V. *Poniattia kadrovoho zabezpechennia publichnoi sluzhby v Ukraini* [The concept of public service staffing in Ukraine]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy. Serii : Derzhavne upravlinnia* [Bulletin of the National University of Civil Defense of Ukraine. Series: Public administration]. 2019, vol. 2 (11), pp. 295–303. (in Ukrainian).
16. Kovalenko Yu.O. *Administratyvno-pravovyi mekhanizm informatsiinoho zabezpechennia protydiv koruptsii v pravookhoronnykh orhanakh Ukrainy* [The administrative and legal mechanism of information support for combating corruption in law enforcement agencies of Ukraine]. Dis. ... Cand. Dc. (Low) : 12.00.07. Kyiv, 2018, 239 p. (in Ukrainian).
17. *Kodeks zakoniv pro pratsiu Ukrainy* [Code of Labor Laws of Ukraine]. 2022, no. 322-VIII. (Update date : 19.08.2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08#Text> (date of application : 05.12.2023). (in Ukrainian).
18. Komirchyi P.O. *Kadrove zabezpechennia publichnoi sluzhby u pravookhoronnii sferi : poniattia ta pravovi vymohy* [Staffing of the public service in the field of law enforcement : concepts and legal requirements]. *Naukovyi visnyk*

Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu. Ser. : Yurysprudentsiia [Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. Ser. : Jurisprudence]. 2019, no. 41, vol. 2, pp. 134–137. (in Ukrainian).

19. Korolenko V.V. and Yurochko T.P. *Kadrova polityka u sferi okhorony zdorovia Ukrainy v konteksti yevropeiskoi intehtratsii* [Personnel policy in the field of health care of Ukraine in the context of European integration : monohr.]. Kyiv : KIM Publ., 2018, 102 p. (in Ukrainian).

20. Korotkykh A.Yu. *Problemy yurydychnoi vidpovidalnosti derzhavnykh sluzhbovtziv za trudovym zakonodavstvom Ukrainy* [Problems of legal responsibility of civil servants under the labor legislation of Ukraine]. Dis. ... Dr. Sc. (Low) : 12.00.05. Kyiv, 2019, 472 p. (in Ukrainian).

21. Kravchenko I.S. *Pravovi zasady realizatsii kadrovoi polityky Natsionalnoi politsii Ukrainy* [Legal basis for the implementation of personnel policy of the National Police of Ukraine]. *Pidpriemnytstvo, hospodarstvo i pravo* [Entrepreneurship, Economy and Law]. 2018, no. 2, pp. 68–72. (in Ukrainian).

22. Liubymov O.K. *Harantii sluzhbovo-trudovoi diialnosti profesiinoho publichnoho sluzhbovtzia* [Guarantees of service and labor activity of a professional public servant]. *Naukovyi visnyk publichnoho ta pryvatnoho prava* [Scientific Bulletin of Public and Private Law]. 2020, vol. 1, pp. 105–110. (in Ukrainian).

23. Moroz A.O. *Vplyv systemy kadrovoho zabezpechennia na formuvannia lideriv "novoї heneratsii". Orhanizatsiino-upravlinski ta psykholohichni aspekty suchasnoho rynku pratsi Ukrainy* [The impact of the human resources system on the formation of "new generation" leaders]. *Orhanizatsiino-upravlinski ta psykholohichni aspekty suchasnoho rynku pratsi Ukrainy: tezy dopovidey VIII Vseukr. nauk.-prakt. konf. molod. uchen.* [Organizational, Managerial and Psychological Aspects of the Modern Labor Market of Ukraine : abstracts of the reports of the VIII All-Ukrainian science and practice conf. young scientist]. Kyiv, 29 Oct. 2019, pp. 126–129. (in Ukrainian).

24. Pierov A.P. *Administratyvno-pravovi zasady profesiinoho navchannia derzhavnykh sluzhbovtziv Ukrainy* [Administrative and legal principles of professional training of civil servants of Ukraine]. Dis. ... Cand. Sc. (Low) : 12.00.07. Kyiv, 2020, 235 p. (in Ukrainian).

25. Popyk A.V. *Administratyvno-pravovi zasady realizatsii kadrovoi polityky v systemi pravosuddia* [Administrative and legal principles of personnel policy implementation in the justice system]. Dis. ... Cand. Sc. (Low): 12.00.07. Kyiv, 2020, 238 p. (in Ukrainian).

26. Reshetilova O.M. and Solomchak A.O. *Zakonodavchi zminy u kadrovomu dilovodstvi v umovakh voiennoho stanu* [Legislative changes in personnel administration under martial law]. *Vcheni zapysky kafedry dokumentoznavstva ta informatsiinoi diialnosti (KDID): zb. nauk. Prats* [Scientific notes of the Department of Document Studies and Information Activities (KDID) : coll. of science works]. Iss. 5, ed. by O.V. Mykhailiuk and oth. Dnipro : USUST Publ., 2023, pp. 66–71. (in Ukrainian).

27. Romashov Yu.S. *Pryntsypy publichnoho administruvannia kadrovoho zabezpechennia Natsionalnoi politsii Ukrainy* [Principles of public administration of personnel support of the National Police of Ukraine]. *Aktualni problemy vitchyznianoї yurysprudentsii* [Actual Problems of Domestic Jurisprudence]. 2019, no. 6, pp. 100–103. (in Ukrainian).

28. Tarnavskiy M.I. *Ekonomichne otsiniuvannia ta pobudova orhaniv upravlinnia personalom pidpriemstv* [Economic evaluation and construction of personnel management bodies of enterprises]. Dis. ... Cand. Sc. (Econ.) : 08.00.04. Lviv, 2018, 233 p. (in Ukrainian).

29. Teteria V. M. *Administratyvno-pravovi zasady kadrovoho zabezpechennia Natsionalnoi politsii Ukrainy na rehionalnomu rivni* [Administrative and legal principles of staffing of the National Police of Ukraine at the regional level]. Thesis abstract Cand. Sc. (Low) : 12.00.07. Kyiv, 2018, 22 p. (in Ukrainian).

30. Tymoshenko V.O. *Administratyvno-pravovi zasady kadrovoho zabezpechennia diialnosti Derzhavnoho biuro rozsliduvan* [Administrative and legal principles of personnel support for the activities of the State Bureau of Investigation]. Dis. ... Cand. Sc. (Low) : 12.00.07. Kyiv, 2020, 235 p. (in Ukrainian).

31. Tur O.V., Tur O.V. and Tiukha V.I. *Vplyv trudovoho zakonodavstva na kadrove administruvannia ta dilovodstvo v orhanizatsii* [The impact of labor legislation on personnel administration and record keeping in the organization]. *Ekonomika ta suspilstvo* [Economy and Society]. 2022, no. 45, pp. 45–56. (in Ukrainian).

32. *Ukraina. Verhovna Rada. Pro orhanizatsiiu trudovykh vidnosyn v umovakh voiennoho stanu vid 15.03.2022, № 2136- IX* [Law of Ukraine. On the organization of labor relations under martial law: 15.03.2022, no. 2136- IX]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2136-20#Text> (in Ukrainian).

33. Shapoval O.A. and Kotenok S.B. *Teoretyko-metodychni zasady upravlinnia kadrovym zabezpechenniam pidpriemstva* [Theoretical and methodological principles of management of human resources of the enterprise]. *Derzhava ta rehiony. Ser. : Ekonomika ta pidpriemnytstvo* [State and Regions. Ser. : Economy and Entrepreneurship]. 2019, no. 4, pp. 134–137. (in Ukrainian).

34. Shchokina Ye.Yu. and Dorofieieva I.S. *Kadrove zabezpechennia yak skladova innovatsiinoho rozvytku rehionu* [Personnel support as a component of the innovative development of the region]. *Pryazovskyi ekonomichnyi visnyk* [Pryazovsky Economic Bulletin]. 2019, no. 6 (17), pp. 246–250. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 28.02.2024.

УДК 622.457:519.6

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.82.1046

АНАЛІЗ РІВНЯ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ

РУСАКОВА Т. І., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, тел.: +38 (066) 394-52-14, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

Анотація. Постановка проблеми. Досліджено динаміку зміни рівня травматизму на виробництві залежно від основних причин настання нещасного випадку. Технічні, організаційні, психофізіологічні, техногенні, соціальні, природні та екологічні причини мають не тільки щільний взаємозв'язок між собою, а і значний вплив на кількість потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом, а також на кількість потерпілих від нещасних випадків на виробництві зі смертельним наслідком. **Мета роботи** – оцінення зміни виробничого травматизму на підприємствах України впродовж 2010–2022 років. Установлення взаємозв'язків між соціальними та виробничими факторами, що впливають на рівень нещасних випадків на виробництві. Створення кореляційно-регресійних моделей для проведення статистичної оцінки та аналізу впливу факторних змінних на результативні показники травматизму. **Методика.** Застосування описової статистики для аналізу динаміки зміни рівня виробничого травматизму. Проведення кореляційного аналізу для встановлення щільності взаємозв'язків між факторними змінними та з результативними ознаками. Використання множинного регресійно-дисперсійного аналізу для отримання коефіцієнтів регресійних математичних моделей і статистичних показників, що пояснюють ймовірність значимості цих коефіцієнтів. Оцінення величини відносної похибки розрахункових даних, отриманих за математичними моделями, для підтвердження їх адекватності. **Наукова новизна.** Розроблено множинні кореляційно-регресійні моделі, які враховують основні причини настання нещасного випадку, як факторні змінні, що впливають на рівень травматизму та рівень нещасних випадків із смертельним наслідком. **Практична значущість.** Математичні моделі дозволяють оцінити вплив основних причин настання нещасних випадків на рівень виробничого травматизму. Впровадження вдосконалених методів та засобів безпечної діяльності на виробництві виступає важливим інструментом для корегування причинно-наслідкових зв'язків виробничого травматизму. **Висновки.** Створено кореляційно-регресійні моделі для аналізу рівня виробничого травматизму. За даними моделями проведено числові розрахунки. Середні значення відносних похибок розрахункових даних складають 1.55 % та 6.08 %, що говорить про адекватність розроблених моделей.

Ключові слова: *рівень травматизму; математична модель; виробнича безпека; кореляційний метод; дисперсійний аналіз; регресійна статистика*

ANALYSIS OF THE LEVEL OF OCCUPATIONAL INJURIES

RUSAKOVA T.I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Naharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (066) 394-52-14, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

Abstract. Problem statement. The task of the research is evaluation the dynamics of changes in the level of injuries at work depending on the main causes of the accident. Technical, organizational, psychophysiological, technogenic, social, natural and environmental causes are closely interrelated and have a significant impact on the number of victims of accidents at the industrial plants, as well as on the number of victims of accidents with fatal consequences. **The purpose of the article.** The assessment of changes in industrial injuries at Ukrainian enterprises during 2010–2022. The establishing connection between social and industrial factors affecting the rate of industrial accidents. The creation of correlation-regression models for statistical evaluation and analysis of the influence of factor variables on the results of injury. **Methodology.** The use of descriptive statistics for the analysis of the dynamics of changes in the level of industrial injuries. Carrying out a correlation analysis to establish the density of connection between factor variables and resulting features. The use of regression-variance analysis to obtain coefficients of regression mathematical models and statistical indicators that explain the probability of significance of these coefficients. Calculation of the value of the relative error of the calculation data obtained according to mathematical models to confirm their adequacy. **Scientific novelty.** Multiple correlation-regression models have been developed that take into account the main causes of the accident as factor variables affecting the injury rate and the rate of fatal accidents. **Practical significance.** Mathematical models make estimate the impact of the main causes of accidents on the level of industrial injuries. The implementation of improved methods and means of safe activity at work is an

important tool for correcting the cause-and-effect relationships of industrial injuries. **Conclusions.** The correlation-regression models were created to analyze the level of industrial injuries in Ukraine. The numerical calculations were carried out according to these models. The average values of the relative errors of the calculated data are 1.55 % and 6.08 %, which indicates the adequacy of the developed models.

Keywords: *injury rate; mathematical model; industrial safety; correlation method; dispersion analysis; regression statistics*

Постановка проблеми. Робоче місце може бути небезпечним, особливо в промисловому середовищі. Велика кількість факторів можуть спричиняти нещасні випадки, починаючи від надмірного напруження і закінчуючи неправильним поводженням з небезпечними матеріалами. Існує також безліч факторів, які можуть спричинювати або впливати на інцидент на робочому місці. Дія небезпечного виробничого чинника на працівника під час виконання ним трудових обов'язків проявляється за умови взаємодії причин різного походження: технічних, організаційних, психофізіологічних, техногенних, соціальних, природних та екологічних.

Сучасні дослідження більшою мірою зосереджені на окремому вивченні причин, що пов'язані з індивідуальними факторами та факторами на робочому місці. Технічні та людські фактори домінують і підвищують ризик нещасних випадків на виробництві. Для ефективного вдосконалення функціонування системи охорони праці необхідне встановлення взаємозв'язків щодо всіх факторів, що впливають на безпеку: технічних, людських, організаційних та екологічних. Математичне прогнозування щодо кількості нещасних випадків на виробництві на основі статистично значущих ефектів взаємодії різного роду факторів створюють можливості до корегування впливу цих факторів, за допомогою вдосконалення чи залучення нових заходів безпеки та економічних інвестицій.

Аналіз останніх досліджень. Багато досліджень проведено щодо оцінки психологічних причин, які впливають на рівень нещасних випадків на виробництві. Стрес, пов'язаний з роботою, може негативно вплинути на психофізіологічний стан робітника, але в багатьох галузях цьому

питанню не приділено належної уваги. Так, у праці [1] виконано аналіз психофізіологічних чинників, що впливають на робітників будівельної галузі. Експериментальні дані аналізувалися за допомогою описової статистики та лінійного регресійного аналізу. Результати показали, що працівники будівельної галузі мають підвищену вразливість до серцево-судинних захворювань, до атеросклерозу та інших негативних наслідків для здоров'я.

У дослідженні [2] показано зв'язок між рівнем стресу та якістю виконуваної роботи. Управління надмірним стресом на робочому місці має вирішальне значення, оскільки професійний стрес негативно впливає на ефективність роботи, а також на баланс між роботою, особистим життям працівників та безпекою праці.

У публікації [3] зосереджено увагу на аналізі впливу технічних, організаційних та людських факторів на аварійність на малих підприємствах. Результати порівнювалися з тенденціями, які переважають на підприємствах країн ЄС. Працівники виробничих підприємств вказують на технічні фактори, що найбільш суттєво впливають на виникнення нещасних випадків на виробництві.

Дослідження [4] проведене з метою виявлення індивідуальних факторів і факторів на робочому місці, що підвищують ризик нещасних випадків. Виявлено технічні та людські фактори, як домінуючі в підвищенні рівня безпеки праці.

У статті [5] показано, що прогнозування небезпечних ситуацій на робочому місці – це необхідна стратегія розвитку будь-якого підприємства. Ідентифікація, аналіз, оцінення та характеристика нових ризиків можуть бути ефективними для отримання безпечного та здорового середовища на робочих місцях.

Метою дослідження [6] було зрозуміти, які із факторів найбільше впливають на послідовність нещасних випадків на виробництві: технічні, людські, експлуатаційні чи організаційні фактори. Доведено, що серед вказаних факторів основну роль у спричиненні нещасних випадків на виробництві відіграють організаційні.

У статті [7] досліджуються соціальні конфлікти, спричинені стихійними лихами. Стихійні лиха часто призводять до смертей, травм, захворювань та інших негативних наслідків для фізичного та психічного здоров'я, що впливає на рівень нещасних випадків на виробництві. Природні, техногенні та екологічні катастрофи можуть викликати соціальні невдоволення, соціальні конфлікти.

Зміна клімату впливає на роботу усіх секторів економіки, навіть на ті, які раніше вважалися нечутливими до клімату. В роботі [8] показано, що на безпеку та гігієну праці також впливає зміна клімату через підвищення температури навколишнього середовища, забруднення повітря в приміщенні та на вулиці, вплив ультрафіолетового випромінювання, екстремальні погодні умови.

Аналіз показав, що для вирішення майбутніх проблем безпеки та гігієни праці в системі управління охороною праці необхідні додаткові дослідження, включаючи кліматологію, медицину, епідеміологію.

Мета статті – оцінення зміни виробничого травматизму на підприємствах України впродовж 2010–2022 років; установлення взаємозв'язків між соціальними та виробничими факторами, що впливають на рівень нещасних випадків на виробництві.

Опис об'єкта. Ставиться задача дослідження динаміки зміни виробничого травматизму в Україні впродовж 2010–2022 років та побудови кореляційно-регресійних моделей для оцінення кількості потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом, за основними причинами настання нещасного випадку.

Методи дослідження. Методи множинного кореляційно-регресійного аналізу для дослідження статистичних показників і встановлення найбільш значимих факторних змінних, які є складовими побудованої математичної регресійної моделі та впливають на результативну ознаку, якою виступають обсяги накопичених відходів.

Методика дослідження. Для аналізу використано статистичні дані Державної служби статистики України щодо травматизму на виробництві в Україні за 2010, 2015–2022 роки [9]. На основі описової статистики середовища Microsoft Excel проаналізовано динаміку зміни загальної кількості потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом (рис. 1) та зі смертельними наслідками (рис. 2).

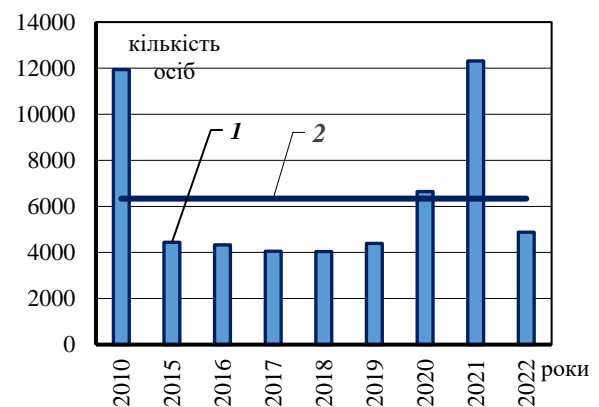


Рис. 1. Динаміка зміни загальної кількості потерпілих від нещасних випадків на виробництві за 2010, 2015–2022 роки: 1 – статистичні дані; 2 – середнє значення

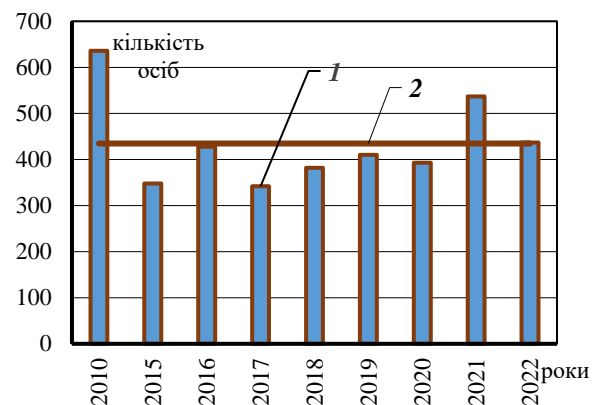


Рис. 2. Динаміка зміни кількості потерпілих зі смертельними наслідками за 2010, 2015–2022 роки: 1 – статистичні дані; 2 – середнє значення

На рисунку 1 показано, як кількісно змінювалась загальна кількість потерпілих від нещасних випадків на виробництві впродовж 2010, 2015–2022 років. Описова статистика дозволяє отримати такі дані: загальна кількість потерпілих від нещасних випадків за вказаний період складає 57 029 осіб; найбільша кількість спостерігалася у 2010 році – 11 942, з 2011 по 2015 рік статистичні дані відсутні, а починаючи з 2015 по 2017 рік рівень знижується і залишається майже незмінним у 2017 та 2018 роках, що складає 4 050 та 4 040 осіб. З 2019 року спостерігається зростання кількості потерпілих, максимальне значення досягається в 2021 році і дорівнює 12 315 осіб, що втричі перевищує мінімальне значення.

Ймовірно, таке зростання пов'язане з розвитком та нарощуванням виробництв в Україні з 2019 по 2021 рік, але без поліпшення заходів щодо безпеки та охорони праці на виробництвах. Різкий спад у 2022 році достовірно пов'язаний із зупинкою промислових виробництв унаслідок їх пошкодження або знищення в результаті воєнних дій агресора. Середнє значення за вказаний період – 6 337 осіб; медіана – 4 438; статистична дисперсія (розмах) ряду даних – 8 275; середнє квадратичне відхилення – 3 378 осіб; асиметрія додатна і складає 1,4, що показує зміщення в бік мінімального значення.

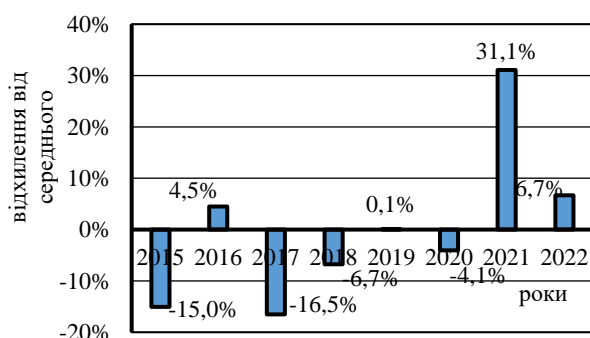


Рис. 3. Відсоткове відхилення кількості потерпілих зі смертельними наслідками від середнього 2015–2022 роки

Динаміка зміни кількості постраждалих зі смертельними наслідками (рис. 2) має такі показники: загальна кількість таких осіб за вказаний період складає 3 913; найбільша

кількість спостерігається у 2010 році – 636, найменша у 2017 році – 342 особи. Починаючи з 2015 по 2022 рік кількість потерпілих зі смертельними наслідками коливається близько середнього значення 410 осіб з відхиленням від нього в межах - 16.5 % ≤ Δ ≤ 31.1 % (рис. 3).

Аналіз кількості загиблих до загальної кількості потерпілих від нещасних випадків показує достатньо стабільну динаміку. Це відношення коливається в межах 4.4 % ≤ Δ₁ ≤ 9.9% (рис. 4).

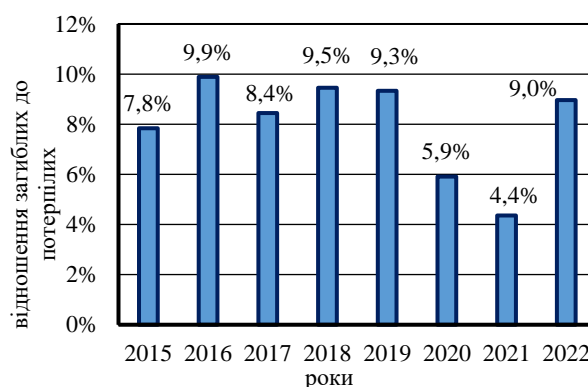


Рис. 4. Відношення числа загиблих до загальної кількості потерпілих від нещасних випадків на виробництві впродовж 2015–2022 років

Можна бачити, що при збільшенні чи зменшенні щорічної кількості потерпілих від нещасних випадків відносна кількість загиблих залишається майже незмінною. Це говорить про стабільність на виробництвах небезпечних факторів, які призводять до смерті потерпілих, тобто про відсутність змін у системі управління охороною праці щодо контролю та впровадження більш дієвих заходів і засобів безпеки.

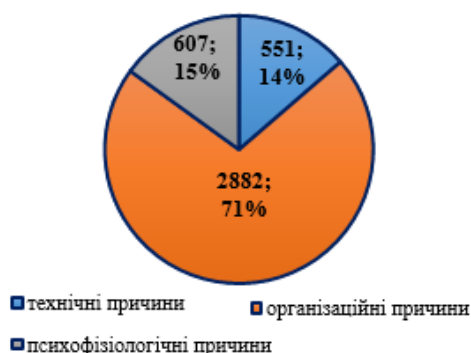


Рис. 5. Розподіл загальної кількості потерпілих від нещасних випадків на виробництві за основними причинами у 2018 році

На рисунку 5 за даними Державної служби статистики України [10] наведено розподіл кількості потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом за основними трьома причинами настання нещасного випадку у 2018 році: технічними, організаційними, психофізіологічним.

Можна бачити, що найбільший відсоток складають організаційні причини – 71 %, тоді як технічні – 14 %, а психофізіологічні причини – 15 %.



Рис. 6. Розподіл загальної кількості потерпілих від нещасних випадків на виробництві за основними причинами у 2022 році

На рисунку 6 за даними Державної служби статистики України [10] наведено розподіл кількості потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом за основними причинами настання нещасного випадку у 2022 році: технічними; організаційними; психофізіологічними; техногенними, соціальними, природними та екологічними.

Можна бачити, що, на відміну від 2018 року, виділено в окрему групу техногенні, соціальні, природні та екологічні причини, які складають 37 %. Організаційні причини – 46 %, їх частка зменшилася на 25 %; технічні причини – 4 %, їх частка зменшилася на 10 %; психофізіологічні причини – 13 %, тобто зменшення лише на 2 %.

Відповідно до методологічного положення державного статистичного спостереження «травматизм на виробництві» 2022 року [9] до групи «техногенні, соціальні, природні та екологічні причини» віднесено викиди

небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, що пов'язано з воєнними небезпеками.

Частка технічних та організаційних причин зменшилася, що пов'язано із пошкодженням або знищенням унаслідок воєнних дій великих та малих промислових підприємств. Тоді як частка психофізіологічних причин майже не змінилася, оскільки психологічне навантаження залишається постійним у часі, тому що війна в країні значно впливає на психофізіологічні якості працівників і спричинює збільшення небезпечних ситуацій на виробництві.

Для встановлення зв'язків між факторними величинами, якими виступають причини настання нещасних випадків, що впливають на загальну кількість потерпілих від нещасних випадків на виробництві, проведено кореляційно-регресійний аналіз.

Застосування методів кореляції та регресії дозволяє виконати основні завдання:

1. Встановити кореляційні зв'язки між факторними змінними та силу зв'язку з результативною змінною.

2. Визначити та кількісно виміряти ступінь впливу одних причин настання нещасних випадків на інші та ступінь впливу цих причин на загальну кількість потерпілих та померлих.

Таблиця

Коефіцієнти кореляції між факторними величинами

	x_1	x_2	x_3	x_4	$y_1(x)$	$y_2(x)$
x_1	1	0.861	0.890	0.544	0.863	0.831
x_2		1	0.826	0.611	0.908	0.896
x_3			1	0.848	0.897	0.891
x_4				1	0.875	0.729
$y_1(x)$					1	0.889
$y_2(x)$						1

Примітка: x_1 – технічні причини, x_2 – організаційні причини, x_3 – психофізіологічні причини, x_4 – техногенні, соціальні, природні, екологічні, причини, $y_1(x)$ – кількість потерпілих від нещасних випадків (гострих професійних захворювань, отруєнь, аварій та від нещасних випадків зі смертельним наслідком, $y_2(x)$ – кількість потерпілих від нещасних випадків зі смертельним наслідком.

3. Отримати кореляційно-регресійну модель та перевірити її адекватність. Коефіцієнти кореляції наведено в таблиці, з якої видно, що ступінь кореляції результативних змінних $y_1(x_i)$ та $y_2(x_i)$ з факторними змінними x_1, x_2, x_3, x_4 є середнім у межах від 0.4 до 0.6 та високим у межах від 0.6 до 0.9. Оскільки відсутній слабкий та дуже високий ступінь кореляції (мультиколінеарність), ніякої факторної змінної не потрібно вилучати із розгляду.

Рівняння множинної лінійної регресії, що надає зв'язок між факторними змінними x_1, x_2, x_3, x_4 та результативною змінною $y_1(x_i)$, набуло такого вигляду (1):

$$y_1(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4, \quad (1)$$

де відповідні коефіцієнти регресії у рівнянні (1) дорівнюють: $a_0 = -364.4$, $a_1 = -1.1$, $a_2 = 0.13$, $a_3 = 7.35$, $a_4 = 0.25$.

Для знайдених коефіцієнтів регресії P -показники, що визначають ймовірності їх значущості, дорівнюють: 0.056, 0.031, 0.052, 0.006, 0.042. Усі визначені P -значення є в межах 0.05, що підтверджує їх вагомий вплив на змінну $y_1(x_i)$, де $i = 1, \dots, 4$.

Результати регресійної статистики такі: множинний коефіцієнт R , що визначає значення коефіцієнта кореляції, дорівнює 0.999; коефіцієнт R^2 складає 0.998 і показує, яка частина результативної змінної $y_1(x_i)$ пояснюється рівнянням регресії, в даному розрахунку 99.8 % варіацій кількості постраждалих від нещасних випадків на виробництві пояснюється змінними причин x_i настання нещасних випадків.

Відповідно до результатів дисперсійного аналізу значимість коефіцієнта Фішера, $F = 4.174 \cdot 10^{-6} < 0.01$ показує, що отриманий результат високо значимий.

Для визначення адекватності отриманої кореляційно-регресійної моделі обчислено $y_1(x_i)_{\text{розрах.}}$ та відносну похибку результатів розрахунку за моделювальним рівнянням. Середнє значення відносної похибки склало $\Delta_{\text{сер.1}} = 1.55 \%$, а максимальне значення похибки $\Delta_{\text{макс.1}} = 4.02 \%$. Таким чином, кореляційно-регресійна модель (1) з точністю на 98.45 % описує динаміку зміни

кількості потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом, залежно від основних причин настання нещасного випадку.

Рівняння множинної лінійної регресії, що надає зв'язок між факторними змінними x_1, x_2, x_3, x_4 та результуючою змінною $y_2(x_i)$, набуло такого вигляду (2):

$$y_2(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4, \quad (2)$$

де відповідні коефіцієнти регресії у рівнянні (2) дорівнюють: $b_0 = 242.1$, $b_1 = 0.072$, $b_2 = 0.088$, $b_3 = -0.375$, $b_4 = 0.101$. Вплив коефіцієнтів регресії у моделювальному рівнянні (2) достатньо високий, оскільки P -показники для знайдених коефіцієнтів регресії відповідно дорівнюють: 0.028, 0.015, 0.037, 0.026, що значно менше 0.05 і підтверджує високу ймовірність їх значущості для результативної змінної $y_2(x_i)$, де $i = 1, \dots, 4$.

Отримано наступні результати регресійної статистики: множинний $R = 0.943$; $R^2 = 0.889$ і показує, що 88.9 % результативної змінної $y_2(x_i)$ пояснюється рівнянням регресії. Значимість коефіцієнта Фішера, $F = 0.0034 < 0.01$, відповідно до результатів дисперсійного аналізу показує, що отриманий результат також високо значимий. Результати розрахунку $y_2(x_i)_{\text{розрах.}}$ відповідно до рівняння (2), показують, що середнє значення відносної похибки $\Delta_{\text{сер.2}} = 6.08 \%$, а максимальне значення похибки $\Delta_{\text{макс.2}} = 13.84 \%$.

Кореляційно-регресійна математична модель (2) з точністю на 94 % описує динаміку зміни кількості потерпілих від нещасних випадків зі смертельним наслідком, залежно від основних причин настання нещасного випадку.

Наукова новизна та практична цінність. Розраховано множинну кореляційно-регресійну модель для оцінювання впливу основних причин настання нещасних випадків на загальну кількість потерпілих від нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом, а також на кількість потерпілих зі смертельним наслідком. Математична модель враховує

ряд факторних змінних, що мають між собою високий взаємозв'язок та впливають на кількісний рівень потерпілих на виробництві.

Висновки

1. Проаналізовано динаміку зміни загальної кількості потерпілих від нещасних випадків на виробництві та динаміку зміни кількості потерпілих зі смертельними наслідками за 2010, 2015–2022 роки. На основі описової статистики встановлено закономірності їх зміни. Для загальної кількості потерпілих спостерігається різна тенденція зміни (зростання та спадання), тоді як кількість загиблих залишається достатньо стабільною і коливається близько середнього значення 410 осіб з відхиленням від нього в межах $-16.5\% \leq \Delta \leq 31.1\%$. Кількість загиблих до загальної кількості потерпілих від нещасних випадків змінюється в межах $4.4\% \leq \Delta_1 \leq 9.9\%$, що має незначний діапазон розбіжностей.

2. Проведено кореляційний аналіз зв'язків між основними причинами настання нещасних випадків та кількістю потерпілих та загиблих на виробництвах. Спостерігається висока щільність цих зв'язків між усіма вищезазначеними

факторними змінними та з результативними величинами.

3. На основі дисперсійно-регресійного аналізу отримано регресійну математичну модель. Установлено, що вплив коефіцієнтів регресії достатньо високий, а отриманий результат також високо значимий. Середні значення відносних похибок розрахунків за математичними регресійними моделями щодо кількості потерпілих $y_1(x_i)_{\text{розрах.}}$ та кількості загиблих $y_2(x_i)_{\text{розрах.}}$ складають 1.55 % та 6.08 %, що говорить про адекватність отриманих моделей.

Удосконалення методів та засобів безпечної діяльності людини на виробництві, зведення параметрів потенційних небезпек до особистих психофізіологічних характеристик людини, застосування ресурсозберігальних технологій, вдосконалення технологічності процесів може зменшити кількість потерпілих та загиблих на виробництвах.

Моделювальні рівняння (1)–(2) дозволяють, корегуючи причини настання нещасних випадків, передбачити кількісні результати травматизму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nwaogu J. M., Chan Albert P.C. Work-related stress, psychophysiological strain, and recovery among on-site construction personnel. *Automation in Construction*. 2021. № 125. Pp. 103629. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103629>
2. Chae J., Hwang S., Seo W., Kang Y. Relationship between rework of engineering drawing tasks and stress level measured from physiological signals. *Automation in Construction*. 2021. № 124. Pp. 103560 URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103560>
3. Niciejewska M., Idzikowski A., Lestyánszka Škurková K. Impact of technical, organizational and human factors on accident rate of small-sized enterprises. *Management systems in production engineering*. 2021. № 29 (2). Pp. 139–144. URL: <https://doi.org/10.2478/mspe-2021-0018>
4. Barlas B., Izci F. B. Individual and workplace factors related to fatal occupational accidents among shipyard workers in Turkey. *Safety Science*. 2018. № 101. Pp. 173–179.
5. Sánchez A., González C., Brocal F. Assessment of emerging risk level by occupational exposure to hand-arm vibrations: Approach under uncertainty conditions. *Safety Science*. 2019. № 114. Pp. 140–147. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.01.002>
6. Eskandari D., Jafari M. J., Mehrabi Y., Kian M. P., Charkhand H., Mirghotbi M. A Qualitative study on organizational factors affecting occupational accidents. *Iranian journal of public health*. 2017. № 46 (3). Pp. 380–388.
7. Jiuping X., Wang Z., Shen F., Ouyang C., Tu Y. Natural disasters and social conflict : A systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2016. № 17. Pp. 38–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.04.001>
8. Hooste W. V. Climate change: impact on occupational safety and health. *European agency for safety and health at work*. 2023. URL: <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/climate-change-impact-occupational-safety-and-health-osh>
9. Травматизм на виробництві : Методологічні положення державного статистичного спостереження. Київ, 2022. URL: https://ukrstat.gov.ua/norm_doc/2022/204/204.pdf (дата звернення: 12.01.2024).
10. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 10.01.2024).

REFERENCES

1. Nwaogu J.M. and Chan Albert P.C. Work-related stress, psychophysiological strain, and recovery among on-site construction personnel. *Automation in Construction*. 2021, no. 125, pp. 103629. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103629>
2. Chae J., Hwang S., Seo W. and Kang Y. Relationship between rework of engineering drawing tasks and stress level measured from physiological signals. *Automation in Construction*. 2021, no. 124, p. 103560 URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103560>
3. Niciejewska M., Idzikowski A. and Lestyánszka Škurková K. Impact of technical, organizational and human factors on accident rate of small-sized enterprises. *Management Systems in Production Engineering*. 2021, no. 29 (2), pp. 139–144. URL: <https://doi.org/10.2478/mspe-2021-0018>
4. Barlas B. and Izci F.B. Individual and workplace factors related to fatal occupational accidents among shipyard workers in Turkey. *Safety Science*. 2018, no. 101, pp. 173–179.
5. Sánchez A., González C. and Brocal F. Assessment of emerging risk level by occupational exposure to hand-arm vibrations: Approach under uncertainty conditions. *Safety Science*. 2019, no. 114, pp. 140–147. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.01.002>
6. Eskandari D., Jafari M.J., Mehrabi Y., Kian M.P., Charkhand H. and Mirghotbi M.A. Qualitative study on organizational factors affecting occupational accidents. *Iranian Journal of Public Health*. 2017, no. 46 (3), pp. 380–388.
7. Jiuping X., Wang Z., Shen F., Ouyang C. and Tu Y. Natural disasters and social conflict : A systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2016, no. 17, pp. 38–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.04.001>
8. Hooste W.V. Climate change: impact on occupational safety and health. European agency for safety and health at work. 2023. URL: <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/climate-change-impact-occupational-safety-and-health-osh>
9. *Travmatyzm na vyrobnytstvi: metodolohichni polozhennya derzhavnoho statystychnoho sposterezhennya* [Injuries at work : Methodological provisions of the state statistical observation]. Kyiv, 2022, application date: 10.01.2024. URL: https://ukrstat.gov.ua/norm_doc/2022/204/204.pdf Application date 01/12/2024. (in Ukrainian).
10. *Derzhavna sluzhba statyky Ukrainy* [State Statistics Service of Ukraine]. Application date: 10.01.2024. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.02.2024.

УДК 624.012:539.376

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.90.1047

РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСАДКИ І ПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ

СЛОБОДЯНИУК С. О.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (066) 213-78-23, e-mail: slobodianiuk.sergey@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4874-7296

Анотація. Постановка проблеми. У розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати усадку і повзучість бетону, які є не другорядним фактором, тому що за тривалої експлуатації таких споруд ці фактори можуть суттєво змінювати напружено-деформований стан конструкцій у часі та викликати появу граничних деформацій, тріщин і їх руйнування. Тому у проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати вплив усадки і повзучості бетону. Для цього проєктант повинен мати параметри, які входять у рівняння і розрахункові формули. Цих параметрів багато і вони визначаються експериментально та залежать від багатьох факторів. Однак проєктант повинен мати ці параметри уже тоді, коли ще немає ніяких експериментальних даних про матеріал і конструкцію, але коли матеріал (клас міцності) уже заданий. Таким чином, виникає необхідність розрахункового визначення необхідних параметрів на основі головних факторів. Найпростіше розрахункове визначення характеристик повзучості бетону можливе за теорією старіння при постійному модулі пружності бетону, яка частково враховує післядію (оборотність) деформацій повзучості. Таку теорію будемо називати технічною теорією старіння і вона оперує найменшою кількістю параметрів (усього 2) та тільки однією кривою повзучості при початковому віку навантаження t_0 , а не сімейством цих кривих. **Мета статті** – розроблення теоретичних рішень та практичних способів урахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування. **Висновок.** Отримано розвиток зручної для практичного використання лінійної теорії повзучості бетону – технічної теорії старіння, і розробку на її основі теоретичних рішень та практичних способів урахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування.

Ключові слова: бетон; усадка; характеристика повзучості; технічна теорія старіння

CALCULATED VISION OF SHRINKAGE AND TOUCH CHARACTERISTICS OF CONCRETE

SLOBODIANIUK S.O.

Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (066) 213-78-23, e-mail: slobodianiuk.sergey@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4874-7296

Abstract. Raising of problem. When calculating concrete and reinforced concrete structures, it is necessary to take into account the shrinkage and creep of concrete, which are not a minor factor. Because during long-term operation of such structures, these factors can significantly change the stress-strain state of structures over time and lead to the appearance of extreme deformations, cracks and their destruction. Therefore, when designing concrete and reinforced concrete structures, it is necessary to take into account the influence of shrinkage and creep of concrete. To do this, the designer must have the parameters included in the equations and calculation formulas. There are numerous of parameters and they are determined experimentally and depend on many factors. However, the designer must have these parameters even when there is no experimental data on the material and design, but when the material (strength class) has already been specified. Thus, there is a need to calculate the required parameters based on the main factors. The simplest computational determination of the creep characteristics of concrete is possible using the theory of aging at a constant modulus of elasticity of concrete, which partially takes into account the aftereffect (reversibility) of creep deformations. We will call such a theory the technical theory of aging and it operates with the smallest number of parameters (2 in total) and only one creep curve at the initial load age t_0 , and not with a family of these curves. **Purpose.** Development of theoretical solutions and practical methods for taking into account the design characteristics of shrinkage and creep of concrete in building design standards. **Conclusion.** The work resulted in the development of a convenient for practical use linear theory of concrete creep – the technical theory of aging and the development on its basis of theoretical solutions and practical methods for taking into account the calculated characteristics of shrinkage and creep of concrete in building design standards.

Keywords: concrete; shrinkage; creep characteristics; technical theory of aging

Постановка проблеми. Під час розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій (ЗБК) визначають зусилля, які виникають на всіх стадіях роботи (виготовлення, транспортування, монтаж, експлуатація) і потім перевіряють їх по першій і другій групах граничного стану. Якщо залізобетонна конструкція статично не визначена, зусилля в ній залежать від співвідношення деформацій елементів цієї конструкції, а оскільки на ці деформації у часі сильно впливає усадка і повзучість бетону, визначати зусилля в загальному випадку необхідно з урахуванням цих тривалих процесів. Тому в такому розрахунку міцності і стійкості ЗБК (перша група) необхідно враховувати тривалі процеси – усадку і повзучість бетону. При розрахунку деформацій, жорсткості і тріщиностійкості (переміщень, прогинів, втрат попереднього напруження тощо) ЗБК (друга група) вплив тривалих процесів ще більш суттєвий, тому їх також необхідно враховувати.

Таким чином, для розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати усадку і повзучість бетону, які є не другорядним фактором, оскільки за тривалої експлуатації таких споруд ці фактори можуть суттєво змінювати напружено-деформований стан конструкцій у часі та викликати появу граничних деформацій, тріщин і їх руйнування.

При проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати вплив усадки і повзучості бетону. Для цього проєктант повинен мати параметри, які входять у рівняння і розрахункові формули. Цих параметрів багато і вони визначаються експериментально та залежать від багатьох факторів. Однак проєктант повинен мати ці параметри уже тоді, коли ще немає ніяких експериментальних даних про матеріал і конструкцію, але коли матеріал (клас міцності) уже заданий.

Таким чином, виникає необхідність розрахункового визначення необхідних параметрів на основі головних факторів. Найпростіше розрахункове визначення

характеристик повзучості бетону можливе за теорією старіння при постійному модулю пружності бетону, яка частково враховує післядію (оборотність) деформацій повзучості [20]. Таку теорію будемо називати технічною теорією старіння (ТТС) і вона оперує найменшою кількістю параметрів (усього 2) та тільки однією кривою повзучості при початковому віку навантаження t_0 , а не сімейством цих кривих.

Аналіз публікацій. Класичну теорію старіння (ТС) створили Ц. Уїтней у 1932 р., Ф. Дішингер у 1934 р. і незалежно від них М. О. Буданов у 1936 році. В подальшому її використовували і вдосконалювали такі вчені як Я. В. Столяров, В. А. Бовін, І. І. Улицький, О. Б. Голишев, Я. Д. Лівшиц, Є. А. Яценко, А. М. Смирнов, Б. Ф. Деркач, С. Е. Фрайфельд, Г. Рюле, Ф. Леонгардом та ін.

Ця теорія приймає допущення про паралельність кривих повзучості, які відповідають різним термінам початку навантаження бетону, тобто характеристика повзучості визначається за формулою:

$$\varphi(t, \tau) = \varphi(t) - \varphi(\tau). \quad (1)$$

Також суттєвий вклад у розроблення і удосконалення цієї теорії внесли вітчизняні науковці Дніпропетровської школи повзучості (ДІБ–ДІБІ–ПДАБА) д. т. н., професори: М. О. Буданов (у 1936 р. незалежно створив і розробив теорію старіння, яка не враховує оборотність деформацій повзучості); В. А. Бовін використовував ТС для розрахунку ЗБК починаючи з 1939 р.; Є. А. Яценко у 1962 році створив і розробив модифіковану теорію старіння (МТС), яка враховує оборотність деформацій повзучості; О. Б. Голишев виконував дипломну роботу під керівництвом проф. М. О. Буданова, закінчив ДІБІ у 1953 році і пізніше очолив Київську школу повзучості після І. І. Улицького.

У статті використано тільки монографії вищезгаданих вчених, науково-нормативну

літературу [1–19] і авторів [20–24] та виконаний їх аналіз за 50 років.

Мета статті – розвиток зручної для практичного використання лінійної теорії повзучості бетону – технічної теорії старіння, і розроблення на її основі теоретичних рішень та практичних способів урахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування.

Виклад матеріалу. Фактичні напруження, які виникають у процесі тривалої експлуатації бетонних і залізобетонних споруд, не перевищують в основному 0,45 межі міцності бетону $f_{ck}(t_0)$, тому лінійна повзучість становить найбільший інтерес з точки зору їх проектування. На жаль, у ДБН В.2.6-98:2009 [18] для розрахунку ЗБК на усадку взагалі відсутні дані по бетону, а з повзучості немає даних по $\varphi(\infty, t_0)$.

Проектант повинен розуміти, що з моменту виготовлення бетонної або залізобетонної конструкції в ній з часом t виникають самовільні відносні деформації усадки бетону:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh}(\infty) (1 - e^{-\gamma t}) = \varepsilon_{sh}(\infty) \Phi_t, \quad (2)$$

які не залежать від напруження. Потім в момент навантаження цієї конструкції напруженням σ_0 у віці бетону $\tau = t_0$ в ній виникає пружно-миттєва відносна деформація:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0}(t_0) = \sigma_0/E_0 \quad (3)$$

і далі за постійних навантажень напруженням $\sigma_0 = \text{const}$ у часі t виникає проста повзучість:

$$\varepsilon_{ct}^0 = C(t, t_0) \sigma_0 = \varphi_t \sigma_0/E_0. \quad (4)$$

При монотонно змінних у часі напруженнях $\sigma(t) = \sigma_0 + \sum_{\tau_i=t_0}^{\tau_i=t} \Delta\sigma(\tau_i)$ відносні деформації повзучості знаходять за формулою:

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{ct}^0 + \int_{t_0}^t \frac{d\varepsilon_{ct}}{d\tau} d\tau. \quad (5)$$

$$\vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_0 \\ \dot{\varepsilon}_0 \\ \ddot{\varepsilon}_0 \\ \dots \end{pmatrix}; \quad \vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_0 \\ \dot{\sigma}_0 \\ \ddot{\sigma}_0 \\ \dots \end{pmatrix}; \quad \vec{\varepsilon}_u = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varepsilon}_{u0} \\ \ddot{\varepsilon}_{u0} \\ \dots \end{pmatrix}; \quad (E + C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \varphi_0 & 1 & 0 \\ 0 & \varphi_0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Таким чином, повні відносні деформації бетону в момент часу t знаходять за формулою:

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_y + \varepsilon_0 + \varepsilon_{ct} = \varepsilon_{ct}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{c0}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0). \quad (6)$$

Підставивши (3) і (4, 5) у (6), отримаємо залежність між відносними деформаціями та напруженнями в бетоні. Для лінійної повзучості теорії старіння (ТС) при $\sigma_0 = \text{const}$ (проста повзучість) ця залежність буде:

$$E_0 \varepsilon_{ct} = E_0 \varepsilon_{sh} + \sigma_0 + \varphi_t \sigma_0. \quad (7)$$

При монотонно змінних у часі напруженнях $\sigma(t) = \sigma_0 + \sum_{\tau_i=t_0}^{\tau_i=t} \Delta\sigma(\tau_i)$ ця залежність для лінійної технічної теорії старіння (ТТС, $E_0 = \text{const}$, $t_0 = 0$) буде:

$$E_0 \varepsilon_{ct} = E_0 \varepsilon_{sh} + (1 + \varphi_t) \sigma_0 + \int_0^t d\sigma_{\tau} / d\tau (1 + \varphi_t - \varphi_{\tau}) d\tau. \quad (8)$$

При заміні інтеграла алгебраїчним рівнянням одержимо наближене рішення:

$$E_0 \varepsilon_{ct} \approx E_0 \varepsilon_{sh} + \sigma_0 k_{1t} + \sigma_t k_{2t}, \quad (9)$$

де коефіцієнти дорівнюють по ТС:

І. І. Улицький [1, с. 69]

$$k_{1t} = \varphi_t/2; \quad k_{2t} = 1 + \varphi_t/2; \quad (10)$$

по МТС:

О. Б. Голишев [12, с. 46]

$$k_{1t} = (1 - \alpha) \varphi_t/2; \quad k_{2t} = 1 + (1 + \alpha) \varphi_t/2; \quad \alpha = 0,5/\xi_{1t}; \quad (11)$$

Я. Д. Лівшиц [7, с. 29]

$$k_{1t} = (1 - \alpha) \varphi_t/3; \quad k_{2t} = 1 + (2 + \alpha) \varphi_t/3; \quad \alpha = 0,45/\xi_{1t}; \quad (12)$$

при $E_0 = \text{const}$, $t_0 = 0$, $\varphi_t = \varphi_0 (1 - e^{-\gamma t}) = \varphi_0 \Phi_t$.

Точний розв'язок інтегрального рівняння (8) одержав д. т. н., проф., академік АБУ Євген Андрійович Яценко (мій Учитель) матричним методом початкових параметрів повзучості (ММППП) [14, с. 65]:

$$E_0 \vec{\varepsilon}_{ct} = E_0 \vec{\varepsilon}_y + (E + C) \vec{\sigma}_t \quad (13)$$

або

$$E_0 \vec{\varepsilon} = E_0 \vec{\varepsilon}_u + (E + C) \vec{\sigma}, \quad (14)$$

де вектори-стовпці початкових параметрів і матриця повзучості дорівнюють:

У векторах крапками над буквами позначено порядок похідної по Φ , а нулики внизу вказують на те, що функції і їх похідні взяті при $\Phi = 0$.

$$F(\Phi) = F_0 + \dot{F}_0 \Phi/1! + \ddot{F}_0 \Phi^2/2! + \ddot{\ddot{F}}_0 \Phi^3/3! + \dots = F_0 + \sum_{n=1}^{n=9} F_0^n \Phi^n/n! , \quad (16)$$

де $\Phi = \Phi_t = (1 - e^{-\gamma t})$; $F_0 = F(0)$; $\dot{F}_0 = \frac{dF}{d\Phi}$ ($\Phi = 0$); $\ddot{F}_0 = d^2F/d\Phi^2$ при $\Phi=0$; $\ddot{\ddot{F}}_0 = d^3F/d\Phi^3$ при $\Phi = 0$; ... і т. д.

Розрахунок параметрів, які характеризують усадку і повзучість бетону, оснований на пропозиції І. І. Улицького [2] обчислювати їх граничні значення як добуток цих нормативних значень (знайдених статистичною обробкою експериментальних даних у нормальних лабораторних умовах) на систему коефіцієнтів, які враховують головні фактори (вік навантаження бетону – ξ_1 ; масштабний фактор – ξ_2 ; вологість середовища – ξ_3). Для усадки і повзучості бетону ці розрахункові залежності відповідно мають вигляд:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh}(\infty) = \varepsilon_{sh}^n \xi_{1y} \xi_{2y} \xi_{3y}$$

і

$$\varphi_0 = \varphi_\infty = \varphi(\infty, t_0) = \varphi_\infty^n \xi_{1p} \xi_{2p} \xi_{3p}. \quad (17)$$

Нормативні граничні значення відносних деформацій усадки ε_{sh}^n та характеристики повзучості бетону φ_∞^n приймаються середньостатистичними із забезпеченням 0,5 і відповідають базовим лабораторним умовам: навантаженням зразків у віці $\tau = t_0 = 28$ діб, їх вологого висихання протягом 7 діб та подальшого натурального твердіння зразка за вологості навколишнього середовища 60 %.

Нормативною граничною відносною деформацією усадки бетону ε_{sh}^n називається її гранична величина при $t \rightarrow \infty$, яка відраховується з моменту закінчення вологого висихання протягом 7 діб бетонних зразків розміром $150 \times 150 \times 600$ мм та подальшого натурального твердіння за вологості навколишнього середовища 60 %.

Нормативна гранична характеристика повзучості бетону φ_∞^n визначається за формулою:

Шукана функція буде знаходитися точно по (не більше) 10 початковим параметрам ряду Маклорена:

$$\varphi_\infty^n = \varepsilon_n / \varepsilon_0 = E_{cm} C_\infty^n. \quad (18)$$

при $E_{cm} = E_0$ – модулі пружності бетону у віці $\tau = t_0 = 28$ діб.

Нормативною граничною питомою деформацією лінійної повзучості бетону C_∞^n називається гранична величина міри повзучості за $t \rightarrow \infty$, яка спричинена постійним напруженням 0,1 МПа до бетонних зразків розміром $150 \times 150 \times 600$ мм у віці $\tau = t_0 = 28$ діб, їх вологого висихання протягом 7 діб та подальшого натурального твердіння зразка за вологості навколишнього середовища 60 %.

На початковому варіанті проектування стержневих ЗБК у проектанта, як правило, задано тільки вид та клас міцності бетону. Тому пропонується знаходити нормативні граничні характеристики усадки ε_{sh}^n і повзучості φ_∞^n бетону по таблиці 1, які одержані середніми із забезпеченням 0,5 з науково-нормативної літератури [1...19] та їх аналізу за 50 років. Вид бетону для аналізу був взятий тільки один – важкий бетон натурального твердіння.

Як видно з таблиці 1, значення граничної нормативної характеристики повзучості бетону змінюється в межах від $\varphi_\infty^n = 1$ до $\varphi_\infty^n = 4$, як і передбачав І. І. Улицький [1, с. 9] ще у 1960 році. Примітки до таблиці 1 взято з роботи професора О. Б. Голишева [13, с. 5] 2000 року.

На заключному варіанті проектування проектанту стає уже відомий точний вид бетону та його осадка конуса і жорсткість. Тоді більш точні дані граничних нормативних характеристик можна знайти у працях проф. О. Б. Голишева [13; 17].

Тут надано рекомендації тільки для початкового (наближеного) варіанта проектування стержневих бетонних і залізобетонних конструкцій із важкого бетону натурального твердіння.

Таблиця 1

Нормативні характеристики важкого бетону натурального твердіння

Гранична відносна дефор. усадки бетону у віці 7 діб, $\varepsilon_{sh}^n 10^5$	Гранична харак. повз. бет. навант. у віці $\tau=t_0=28$ діб, $\varphi_{\infty}^n = E_{cm} C_{\infty}^n$	Гранична міра повзучості бет. навант. у віці $\tau=t_0=28$ діб, $C_{\infty}^n 10^5$ (1/МПа)	Середній модуль пружності у віці $\tau=t_0=28$ діб, E_{cm} (ГПа)	Гарантована міцність, $f_{ck,cube}$ (МПа)	Нормативний опір, f_{ck} (МПа)	Клас і марки важкого бетону натурального твердіння		
						М	В	С
35	4,00	22	18	10	8	100	10	8/10
35	3,80	18	21	12	10	125	12,5	10/12
33	3,70	16	23	15	12	150	15	12/15
33	3,20	12	27	20	16	200	20	16/20
33	3,00	10	30	25	20	250	25	20/25
33	2,60	8	32,5	30	25	300	30	25/30
33	2,40	7	34,5	35	30	350	35	30/35
33	2,15	6	36	40	32	400	40	32/40
33	2,05	5,5	37,5	45	35	450	45	35/45
33	1,95	5	39	50	40	500	50	40/50
33	1,80	4,5	39,5	55	45	550	55	45/55
33	1,60	4	40	60	50	600	60	50/60
30	1,50	3,5	43	75	60	700	70	60/75
30	1,35	3	45	85	70	800	80	70/85
30	1,15	2,5	46	95	80	900	90	80/95
30	1,00	2	48	105	90	1000	100	90/105

Примітка: 1. Для бетону при термовології обробці значення C_{∞}^n (φ_{∞}^n) і ε_{sh}^n треба помножити на коефіцієнт 0,9. 2. Значення C_{∞}^n (φ_{∞}^n) треба крім цього помножити на коефіцієнти для важкого бетону, виготовленого: 1,35 – на пуцолановому портландцементі; 1,15 – на шлакопортландцементі при навантаженні його в умовах атмосферної вологості; 0,85 – при навантаженні у вологонасиченому середовищі та для бетону, виготовленого на крупному заповнювачі із вапняку. 3. Проміжні значення розрахункових параметрів знаходять по лінійній інтерполяції.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів ξ_i ($i = 1, 2, 3$) для важкого бетону натурального твердіння

Вік бетону в момент навантаження $\tau = t_0$ (діб), $\xi_{1п}$ (для повзучості)	28 і менше	45	60	90	180	365	730 і більше
	1,0	0,90	0,85	0,75	0,65	0,60	0,5
Вік бетону до початку висихання τ (діб), $\xi_{1у}$ (для усадки)	1	7	28	60	90	180	365 і більше
	1,05	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
Модуль відкритої площі елемента M_0 , 1/м $\xi_{2п}$ (для повзучості)	0	5	10	20	40	60	80 і >
	0,70	0,80	0,85	0,90	1,0	1,05	1,10
$\xi_{2у}$ (для усадки)	0,70	0,80	0,85	0,90	1,0	1,05	1,10
	Відносна вологість середовища W, %	40 і <	50	60	70	80	90
$\xi_{3п}$ (для повзучості)	1,30	1,15	1,0	0,90	0,80	0,65	0,50
	$\xi_{3у}$ (для усадки)	1,30	1,15	1,0	0,90	0,80	0,60

Примітка: 1. Модуль відкритої площі елемента $M_0 = F/V$ (F – площа поверхні елемента відкритої для висихання, m^2 ; V – об'єм елемента, m^3). Для стержневих елементів можна за формулою $M_0 = P/A$ (P – периметр поперечного перерізу відкритої поверхні елемента, m ; A – площа поперечного перерізу елемента, m^2), 1/м. 2. Для елементів типових конструкцій, для яких невідомий кліматичний район експлуатації, допускається приймати $\xi_{3п} = \xi_{3у} = 1$.

Розрахункові граничні характеристики усадки ε_{sh} і повзучості φ_0 бетону знаходять за формулами (17), які є їх граничними значеннями при $t \rightarrow \infty$ та відповідають фактичним умовам роботи конструкції. Вони входять у розрахунок конструкції та

визначаються добутком нормативних граничних значень на систему коефіцієнтів, які враховують: вік навантаження бетону – ξ_1 ; масштабний фактор – ξ_2 ; вологість середовища – ξ_3 , відповідно для усадки і повзучості бетону. Їх значення для усадки і

повзучості різні і наведені в таблиці 2. Коефіцієнти ξ_i ($i = 1, 2, 3$) для важкого бетону натурального твердіння взяті середніми із забезпеченням 0,5 з науково-нормативної літератури [2–4; 6–8; 10; 12–14; 17].

Примітка до таблиці 2 взята з роботи професора О. Б. Голишева [13, с. 6] 2000 року.

Якщо силові дії або вимушені деформації (переміщення) прикладають до конструкції поступово в різному віці, то значення ε_{sh} і φ_0 визначають з урахуванням віку бетону до моменту прикладення кожного із цих дій.

Визначення швидкості тривалих процесів γ та проміжних значень функції Φ_t

для характеристик усадки $\varepsilon_{sh}(t)$ і повзучості $\varphi(t, t_0)$, відповідно заданому моменту часу t в частках від їх граничних значень, знаходимо по таблиці 3. Вона побудована на основі експериментальних даних та встановленого факту, що криві усадки і повзучості подібні та їх частка складає 75 % і 85 % від граничних значень через один і два роки відповідно [2, с. 14]. Також за унікальними експериментами Девіса, які продовжувались 30 років, можна установити долю усадки і повзучості в 90 % і 95 % від граничних значень через 7 і 15 років відповідно.

Таблиця 3

Проміжні значення функції Φ_t і швидкості тривалих процесів γ

t , діб	3	7	28	60	90	180	365 (1 р.)	730 (2 р.)	2 555 (7 р.)	5 475 (15 р.)
$\varphi_t/\varphi_\infty = \varepsilon_{sh}^t/\varepsilon_{sh}^\infty = \Phi_t$	0,1	0,2	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,90	0,95
γ (1/діб)	0,035	0,032	0,015	0,010	0,009	0,006	0,004	0,0026	0,0009	0,0005

Якщо будуть відомі точні експериментальні дані по шести параметрах спадкової теорії старіння (СТС), для перевірки проєктант може використати цю найбільш точну теорію повзучості. Приклади розрахунків ЗБК і співставлення, за теорією старіння за постійного модуля пружності (ТТС) і спадкової теорії старіння з урахуванням зростання модуля пружності бетону (СТС) модифікованим методом початкових параметрів повзучості (ММППП), можна знайти у працях [20–24].

Пропозиції. Пропонується в ДБН В.2.6.–98:2009 [18] ввести такі зміни:

п. 3.1.3.1 доповнити реченням: «Якщо напруження стиску бетону у віці t_0 не перевищує величину 0,45 $f_{ck}(t_0)$, то повзучість треба розглядати як лінійну»;

п. 3.1.3.2 доповнити реченнями і формулами: «Пружно-миттєва деформація бетону $\varepsilon_{c0}(t_0)$, при напруженні стиску σ_c прикладеної до бетону у віці t_0 , представлена виразом:

$$\varepsilon_{c0}(t_0) = (\sigma_c/E_c),$$

а при напруженні $\sigma_c = \text{const}$ повні відносні деформації бетону у часі t визначаються так:

$$\varepsilon_{ct}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{c0}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t) + (1 + \varphi(\infty, t_0)) (\sigma_c/E_c).$$

Відносні деформації усадки бетону у часі t можна визначити так:

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh}(\infty) (1 - e^{-\gamma t}) = \varepsilon_{sh}(\infty) \Phi_t,$$

а коефіцієнт повзучості, за умови $t_0 = 0$, так:

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi(\infty) \text{ і } \varphi(t, t_0) = \varphi(t) = \varphi(\infty) (1 - e^{-\gamma t}) = \varphi(\infty) \Phi_t,$$

де $\Phi_t = (1 - e^{-\gamma t})$ і γ – швидкість тривалих процесів (1/діб)»;

п. 3.1.3.3 доповнити реченнями, формулами і таблицями: «Розрахункові граничні характеристики бетону для часу $t = \infty$ представлені виразом: для усадки:

$$\varepsilon_{sh}(\infty) = \varepsilon_{sh}^n \xi_{1y} \xi_{2y} \xi_{3y},$$

а для повзучості:

$$\varphi(\infty) = \varphi_\infty^n \xi_{1п} \xi_{2п} \xi_{3п}.$$

Нормативні граничні характеристики усадки ε_{sh}^n і повзучості φ_∞^n для важкого бетону натурального твердіння наведені в таблиці 1.

Коефіцієнти для усадки ξ_{iy} і повзучості ξ_{ip} ($i = 1, 2, 3$) важкого бетону натурального

твердіння, які враховують вплив відхилень фактичних умов навантаження, виготовлення і експлуатації стержневих бетонних і залізобетонних елементів конструкцій від базових, визначаються по таблиці 2.

Якщо силові дії або вимушені деформації (переміщення) прикладають до елементів поступово в різному віці, то значення $\varepsilon_{sh}(\infty)$ і $\varphi(\infty)$ обчислюють з урахуванням віку бетону до моменту прикладення кожної з цих дій.

Показник швидкості тривалих процесів γ та проміжних значень функції Φ_t для характеристик усадки $\varepsilon_{sh}(t)$ і повзучості $\varphi(t)$ бетону, відповідно до заданого моменту часу t в частках від їх граничних значень знаходимо по таблиці 3...»

Висновки

Широке використання бетонних і залізобетонних конструкцій у будівництві робить актуальним при їх проектуванні врахування тривалих процесів – усадки і повзучості бетону. Вміння правильно враховувати деформативність цих процесів у проектуванні необхідне для виготовлення таких конструкцій, які найбільше будуть задовольняти технічним, експлуатаційним і економічним вимогам.

Отримано розвиток зручної для практичного використання лінійної теорії повзучості бетону – технічної теорії старіння (ТТС, $E_0 = \text{const}$, $t_0 = 0$), і розроблено на її основі теоретичні рішення та практичні способи врахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування (ДБН), тобто у проектуванні (розрахунках) бетонних і залізобетонних стержневих конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Улицький І. І., Чжан Чжун-Яо, Голишев О. Б. Розрахунок залізобетонних конструкцій з урахуванням тривалих процесів. Київ : Держ. вид. літ. по будівн. і арх., 1960. 496 с.
2. Улицький І. І. Теорія і розрахунок залізобетонних стержневих конструкцій з урахуванням тривалих процесів. Київ : Будівельник, 1967. 348 с.
3. Бондаренко В. М. Деякі питання нелінійної теорії залізобетону. Харків : Хар. Університет, 1968. 324 с.
4. Лівшиц Я. Д. Розрахунок залізобетонних конструкцій з урахуванням усадки і повзучості бетону. Київ : Вища школа, 1971. 232 с.
5. Довідник інженера-конструктора жилих і громадських будівель за заг. ред. к. т. н. О. А. Диховичного, 1975. 438 с.
6. Голишев О. Б., Поліщук В. П., Руденко І. В. Розрахунок залізобетонних стержневих конструкцій з урахуванням фактора часу : посіб. проєктанту. Київ : Будівельник, 1975. 112 с.
7. Лівшиц Я. Д. Розрахунок залізобетонних конструкцій з урахуванням впливу усадки і повзучості бетону. Київ : Вища школа, 1976. 280 с.
8. Голишев О. Б., Поліщук В. П., Руденко І. В. Розрахунок залізобетонних стержневих конструкцій з урахуванням фактора часу. Київ : Будівельник, 1984. 128 с.
9. БНП 2.03.01-84*. Бетонні і залізобетонні конструкції. Будівельні норми і правила. Київ, 1986. 84 с.
10. Рекомендації по урахуванню повзучості і усадки бетону при розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій. Київ : НДІЗБ, 1988. 120 с.
11. Design of Concrete Structures. EUROCODE № 2. 1989. 94 с.
12. Голишев О. Б. та ін. Проектування залізобетонних конструкцій: довідковий посібник за заг. ред. О. Б. Голишева. Київ : Будівельник, 1990. 544 с.
13. Голишев О. Б., Ткаченко І. Н. Практичні способи урахування повзучості і усадки бетону при розрахунку залізобетонних конструкцій. Київ : Логос, 2000. 88 с.
14. Яценко Є. А., Корнілова С. В., Бовін А. А., Соссу Г. Теорія повзучості залізобетонних конструкцій. Дніпропетровськ : Guadeamus, 2000. 600 с.
15. СНБ 5.03.01-02. Бетонні і залізобетонні конструкції. 2003. 140 с.
16. СП 52-101-03. Бетонні і залізобетонні конструкції без попереднього напруження арматури. 2003. 126 с.
17. Голишев О. Б., Кривошеев П. І. Практичні способи урахування повзучості і усадки бетону при розрахунку збірно-монолітних конструкцій : довідковий посіб. Київ : Логос, 2008. 104 с.
18. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Державні будівельні норми України. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

19. Lira – Soft – ПК ЛПА–9.6–R9–X86–x64–2012. Пояснення до ЛПА 9.6. п. 3.1.4. Повзучість і усадка, 03: 2012. 6 с.
20. Яценко Є. А., Слободянюк С. О. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості бетону. Дніпропетровськ : ПДАБА, «Пороги», 2002. 252 с.
21. Слободянюк С. О., Яценко Є. А. Взаємодія попередньо напруженої арматури з бетоном і розрахунок одношарових стінових панелей з урахуванням повзучості поризованого бетону. Дніпропетровськ : ПДАБА, «Пороги», 2007. 280 с.
22. Слободянюк С. О., Буратинський А. П., Климпотюк Д. В., Титюк А. О., Шаповал В. Г. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості та віброповзучості бетону за заг. ред. д. т. н., проф. С. О. Слободянюка : моногр. в 3 ч. Ч. I. Дніпро : ПДАБА, «Середняк Т. К.», 2014. 156 с.
23. Слободянюк С. О., Буратинський А. П., Щербачов А. Д., Слободянюк О. С., Шаповал А. В. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості та віброповзучості бетону за заг. ред. д. т. н., проф. С. О. Слободянюка : моногр. в 3 ч. Ч. II. Дніпро : ПДАБА, «Середняк Т. К.», 2015. 150 с.
24. Слободянюк С. О., Буратинський А. П., Щербачов А. Д., Слободянюк О. С., Хамрик О. В. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості та віброповзучості бетону за заг. ред. д. т. н., проф. С. О. Слободянюка : моногр. в 3 ч. Ч. III. Дніпро : ПДАБА, «Середняк Т. К.», 2016. 202 с.

REFERENCES

1. Ulytskyi I.I., Zhang Zhong-Yao and Golyshev O.B. *Rozrakhunok zalizobetonnykh konstrukttsii z urakhuvanniam tryvalykh protsesiv* [Calculation of reinforced concrete structures taking into account long-term processes]. Kyiv : State kind. summer by civil engineering and arch., 1960, 496 p. (in Ukrainian).
2. Ulytskyi I.I. *Teoriia i rozrakhunok zalizobetonnykh sterzhnevyykh konstrukttsii z urakhuvanniam tryvalykh protsesiv* [Theory and calculation of reinforced concrete rod structures taking into account long-term processes]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1967, 348 p. (in Ukrainian).
3. Bondarenko V.M. *Deiaki pytannia nelineinoi teorii zalizobetonu* [Some issues of nonlinear theory of reinforced concrete]. Kharkiv : Khar. University Publ., 1968, 324 p. (in Ukrainian).
4. Livshits Ya.D. *Rozrakhunok zalizobetonnykh konstrukttsii z urakhuvanniam usadky i povzuchosti betonu* [Calculation of reinforced concrete structures taking into account the shrinkage and creep of concrete]. Kyiv : Higher School Publ., 1971, 232 p. (in Ukrainian).
5. *Dovidnyk inzhenera-konstruktora zhylykh i hromadskykh budivel* [Handbook of the engineer-designer of residential and public buildings]. in general. ed. Ph. D. O.A. Dykhovychnoy, 1975, 438 p. (in Ukrainian).
6. Golyshev O.B., Polishchuk V.P. and Rudenko I.V. *Rozrakhunok zalizobetonnykh sterzhnevyykh konstrukttsii z urakhuvanniam faktora chasu : posib. proekt* [Calculation of reinforced concrete rod structures taking into account the time factor: manual. the designer]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1975, 112 p. (in Ukrainian).
7. Livshits Ya.D. *Rozrakhunok zalizobetonnykh konstrukttsii z urakhuvanniam vplyvu usadky i povzuchosti betonu* [Calculation of reinforced concrete structures taking into account the influence of shrinkage and creep of concrete]. Kyiv : Higher School Publ., 1976, 280 p. (in Ukrainian).
8. Golyshev O.B., Polishchuk V.P. and Rudenko I.V. *Rozrakhunok zalizobetonnykh sterzhnevyykh konstrukttsii z urakhuvanniam faktora chasu* [Calculation of reinforced concrete rod structures taking into account the time factor]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1984, 128 p. (in Ukrainian).
9. *Betonni i zalizobetonni konstrukttsii. Budivelni normy i pravyla* [Concrete and reinforced concrete structures. Building norms and rules]. BNiP 2.03.01-84*, 1986, 84 p. (in Russian).
10. *Rekomendatsii po urakhuvanniu povzuchosti i usadky betonu pry rozrakhunku betonnykh i zalizobetonnykh konstrukttsii* [Recommendations for taking into account the creep and shrinkage of concrete when calculating concrete and reinforced concrete structures]. NDIZB, 1988, 120 p. (in Russian).
11. Design of Concrete Structures. EUROCODE No. 2, 1989, 94 p.
12. Golyshev O.B. and oth. *Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii : dovidkovyi posibnyk* [Design of reinforced concrete structures : a reference guide]. In general ed. O.B. Golyshev, Kyiv : Budivelnik publ., 1990, 544 p. (in Ukrainian).
13. Golyshev O.B. and Tkachenko I.N. *Praktychni sposoby urakhuvannia povzuchosti i usadky betonu pry rozrakhunku zalizobetonnykh konstrukttsii* [Practical methods of taking into account the creep and shrinkage of concrete in the calculation of reinforced concrete structures]. Kyiv : Logos Publ., 2000, 88 p. (in Ukrainian).
14. Yatsenko E.A., Kornilova S.V., Bovin A.A. and Sossu H. *Teoriia povzuchosti zalizobetonnykh konstrukttsii* [Theory of creep of reinforced concrete structures]. Dnipropetrovsk : Guadeamus Publ., 2000, 600 p. (in Ukrainian).
15. *Betonni i zalizobetonni konstrukttsii* [Concrete and reinforced concrete structures]. SNB 5.03.01-02, 2003, 140 p. (in Russian).
16. *Betonni i zalizobetonni konstrukttsii bez poperednoho napruzhenia armatury* [Concrete and reinforced concrete structures without prestressing the reinforcement]. SP 52-101-03, 2003, 126 p. (in Russian).

17. Golyshev O.B. and Kryvosheev P.I. *Praktychni sposoby urakhuvannia povzuchosti i usadky betonu pry rozrakhunku zbirno-monolitnykh konstruksii : dovidkovyi posibnyk* [Practical ways of taking into account the creep and shrinkage of concrete in the calculation of prefabricated monolithic structures : a reference guide]. Kyiv : Logos Publ., 2008, 104 p. (in Ukrainian).
18. *Betonna ta zalizobetonna konstruksii. Derzhavni budivelni normy Ukrainy* [Concrete and reinforced concrete structures. State building regulations of Ukraine]. DBN V.2.6-98:2009. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 71 p. (in Ukrainian).
19. *Lira – Soft – PK LIRA–9.6–R9–X86–x64–2012. Poiasnennia do LIRA 9.6. p. 3.1.4. Povzuchist i usadka, 03* [Lira – Soft – PC LIRA–9.6–R9–X86–x64–2012. Explanation to LIRA 9.6. clause 3.1.4. Creep and shrinkage, 03]. 2012, 6 p. (in Ukrainian).
20. Yatsenko E.A. and Slobodianiuk S.O. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti betonu* [The theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep of concrete]. Dnipropetrovsk : PSACEA, “Porogy” Publ., 2002, 252 p. (in Ukrainian).
21. Slobodianiuk S.O. and Yatsenko E.A. *Vzaiemodiia poperedno napruzhenoi armatury z betonom i rozrakhunok odnosharovykh stinovykh panelei z urakhuvanniam povzuchosti poryzovanoho beton* [Interaction of prestressed reinforcement with concrete and calculation of single-layer wall panels taking into account the creep of cracked concrete]. Dnipropetrovsk : PSACEA, “Porogy” Publ., 2007, 280 p. (in Ukrainian).
22. Slobodianiuk S.O., Buratynskyi A.P., Klimpotyuk D.V., Tytyuk A.O. and Shapoval V.G. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti ta vibropovzuchosti betonu* [Theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep and vibro-creep of concrete]. In general. ed. Ph. D., prof. S.O. Slobodianiuk's : monogr. in 3 pfrts, P. I, Dnipro : PSACEA, “Serednyak T.K.” Publ, 2014, 156 p. (in Ukrainian).
23. Slobodianiuk S.O., Buratynskyi A.P., Scherbachov A.D., Slobodianiuk O.S. and Shapoval A.V. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti ta vibropovzuchosti betonu* [The theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep and vibro-creep of concrete]. In general. ed. Ph. D., prof. S.O. Slobodianiuk's : monogr. in 3 parts, P. II, Dnipro : PSACEA, “Serednyak T.K.” Publ., 2015, 150 p. (in Ukrainian).
24. Slobodianiuk S.O., Buratynskyi A.P., Scherbachov A.D., Slobodianiuk O.S. and Hamryk O.V. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti ta vibropovzuchosti betonu* [The theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep and vibro-creep of concrete]. In general. ed. Ph. D., prof. S.O. Slobodianiuk's : monogr. in 3 parts, P. III, Dnipro : PSACEA, “Serednyak T.K.” Publ., 2016, 202 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.03.2024.

УДК 666.972.2:624.074

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.99.1048

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕРОБЛЕНОГО КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА В ДЕРЕВОГРУНТОБЕТОННІЙ ПЛИТІ

СМИРНОВ А. С.^{1*}, *асп.*,

МИСЛИЦЬКА А. О.², *асист.*

^{1*} Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-33-00, e-mail: smyrnov.anton@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2500-2323

² Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-33-00, e-mail: myslytska.anastasiia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9609-7270

Анотація. Постановка проблеми. У процесі післявоєнної відбудови в Україні виникне потреба у великій кількості доступних та екологічних будівельних матеріалів, особливо в частині відновлення і будівництва малоповерхових споруд. Такими будівельними матеріалами можуть бути ґрунтобетон та заповнювачі з подрібненого бетонного брукхту. Запропоновано конструктивне рішення ребристого перекриття, в якому ребра виконані із соснових брусів та листів OSB, а плитна частина – з ґрунтобетону по незнімній опалубці. **Мета статті** – визначення оптимального складу ґрунтобетонної суміші із застосуванням щебеню, отриманого після подрібнення бетонного брукхту, враховуючи конфігурацію деревоґрунтобетонної плити, визначення міцності ґрунтобетону такого складу, визначення можливості застосування заповнювачів із подрібненого бетонного брукхту. **Висновки.** За результатами визначення оптимального складу ґрунтобетону встановлено, що максимальна міцність на стиск досягається при масовому вмісті в'язучого в цементно-ґрунтовій суміші на рівні 20 %. Враховуючи конфігурацію плитної частини перекриття для крупного заповнювача прийнята фракція 5...7,5 мм. У ході випробування ґрунтобетонних зразків із рециклінговим заповнювачем з масовим вмістом 10, 20 та 30 % міцність ґрунтобетону на стиск зменшилась. Очевидно, наявність глинистого компонента (суглинку) в суміші зменшує зчеплення в контактній зоні між заповнювачем і ґрунтобетоном, що збільшує неоднорідність всієї структури ґрунтобетону. Отже, використання натуральних або рециклінгових крупних заповнювачів у ґрунтобетоні недоцільне. Враховуючи визначену міцність ґрунтобетону без заповнювача, пропонуємо схему комбінованого бетонування ґрунтобетонної плити – важкий бетон над ребром та ґрунтобетон у звисах. У такому випадку існує потреба в дослідженнях щодо можливості застосування рециклінгового щебеню необхідної крупності у важкому бетоні.

Ключові слова: ґрунтобетон; крупний заповнювач; рециклінговий щебень

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING RECYCLED COARSE AGGREGATE IN A WOOD-SOIL CONCRETE SLAB

SMYRNOV A.S.^{1*}, *Postgraduate Student*,

MYSLYTSKA A.O.², *Ass.*

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-33-00, e-mail: smyrnov.anton@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2500-2323

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-33-00, e-mail: myslytska.anastasiia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9609-7270

Abstract. Problem statement. During the process of post-war reconstruction in Ukraine, there will be a need for a large number of affordable and ecological building materials, especially in the part of restoration and construction of low-rise buildings. Such building materials can be soil-concrete and aggregates from crushed concrete waste. The proposed constructive solution of the ribbed floor, in which the ribs are made of pine beams and OSB sheets, and the slab part is made of soil concrete on fixed formwork. **The purpose of the article** is to determine the optimal composition of the soil-concrete mixture using crushed stone obtained after crushing concrete scrap, taking into account the configuration of the wood-soil concrete slab, to determine the strength of soil-concrete of this composition, to determine the possibility of using recycled coarse aggregates. **Conclusions.** Based on the results of determining the

optimal composition of soil-concrete, it was established that the maximum compressive strength is achieved when the mass content of the binder in the cement-soil mixture is at the level of 20 %. Taking into account the configuration of the slab part of the floor, a fraction of 5...7.5 mm is accepted for coarse aggregate. During the test of soil-concrete samples with recycled aggregate with a mass content of 10 %, 20 % and 30 %, the compressive strength of soil concrete decreased. Obviously, the presence of a clay component (loam) in the mixture reduces the adhesion in the contact zone between the aggregate and the soil-concrete, which increases the heterogeneity of the entire structure of the soil-concrete. Thus, the use of natural or recycled coarse aggregates in soil-concrete is impractical. Taking into account the determined strength of soil-concrete without aggregate, a scheme of combined concreting of the soil-concrete slab is proposed – heavy concrete above the rib and soil-concrete in the overhangs. In this case, there is a need for research on the possibility of using recycled coarse aggregate of the required size in heavy concrete.

Keywords: *soil-concrete; coarse aggregate; recycled coarse aggregate*

Постановка проблеми. У процесі післявоєнної відбудови України суттєва кількість будівель і споруд підлягатиме частковому демонтажу або повному знесенню, внаслідок чого утвориться великий обсяг будівельних відходів. За різними оцінками понад половину в загальному обсязі будівельних відходів складає бетонний та залізобетонний брухт [5].

У квітні 2022 року на офіційній сторінці Мінрегіону у Facebook опубліковано пост про те, що з метою недопущення екологічного лиха в Україні розробляють механізми утилізації та повторного використання будівельних відходів, що утворились внаслідок масових руйнувань інфраструктури [9].

Згідно з прийнятим у 2022 р. Порядком [6] документація з демонтажу має розроблятися з урахуванням максимальної переробки відходів. А в додатку 1 до Порядку [7] запропоновано повторне використання бетонних та залізобетонних

відходів як сировини для виробництва крупного та дрібного заповнювачів для бетонів (класу до С20/25).

Через відсутність нормативних документів, які регулюють застосування продуктів рециклінгу бетонних відходів, на даний момент в Україні вони широко не застосовуються. Але результати деяких досліджень дозволяють зробити припущення про доцільність використання таких вторинних заповнювачів у конструкціях малоповерхових будівель за умови належного сортування та визначення фактичних характеристик отриманого щебеню.

Одним із варіантів таких конструкцій запропоновано деревогрунтобетонне перекриття для малоповерхових будівель. Конструктивно таке рішення являє собою ребристе перекриття, в якому по ребрах, що виконані у вигляді дерев'яних двотаврових балок, влаштована ґрунтобетонна плита (Рис. 1).

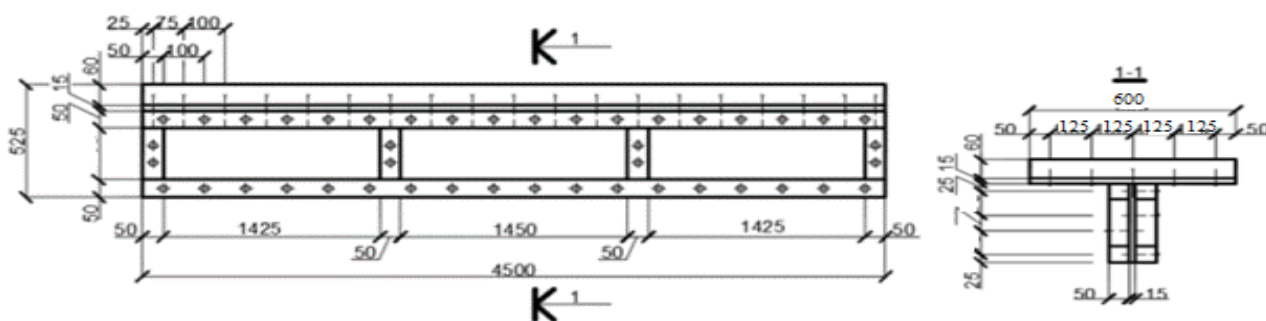


Рис. 1. Конструктивне рішення деревогрунтобетонного перекриття

Ребра з'єднані між собою по верхніх поясах за допомогою листів OSB, які одночасно є незнімною опалубкою та елементом армування ґрунтобетонної плити. У свою чергу ґрунтобетонна плита з'єднана

з незнімною опалубкою за допомогою нагельних з'єднань, що виконують роль анкерів. Пояси і стінка ребра також з'єднані між собою нагельями.

Пояси таких складених балок

виконуються із соснового дерев'яного бруса квадратного перерізу зі стороною 35...70 мм. Висоту поясів приймають у межах $h_n \geq h_6/6$. Для стінок використовується водостійка панель OSB товщиною від 8 до 16 мм, $h_c \geq I_6/10$. Ширину опорного ребра приймають рівною висоті поясу. Поперечні ребра розміщують у місцях примикання поперечних балок і прикладання місцевого навантаження.

За попередніми розрахунками оптимальна конфігурація такого перекриття становить:

- довжина плити 4 500 мм;
- висота плитної частини 60 мм;
- крок дерев'яних балок (ребер) 600 мм.

Виокремлення невирішеної проблеми.

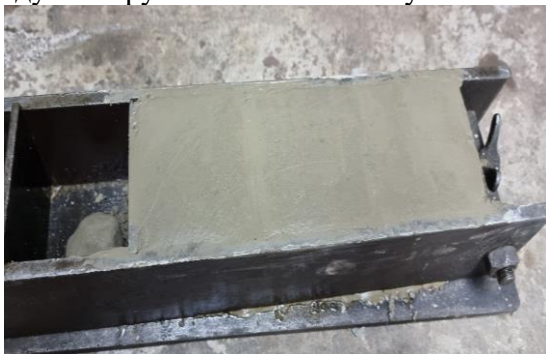
Виходячи з параметрів дерево-грунтобетонного перекриття, необхідно підібрати склад суміші та визначити міцність ґрунтобетону плити, а також дослідити доцільність і можливість застосування крупного заповнювача, отриманого в результаті подрібнення бетонних відходів.

Мета статті – визначення оптимального складу ґрунтобетонної суміші із

застосуванням щебеню, отриманого після подрібнення бетонного брухту, визначення міцності ґрунтобетону такого складу, визначення можливості застосування рециклінгового щебеню.

Виклад матеріалу. На першому етапі дослідження автори виконали підбір оптимального складу ґрунтобетонної суміші та випробували на міцність зразки ґрунтобетону. Підбір складу здійснювали шляхом різних поєднань (у ваговому вираженні) компонентів ґрунтобетонних сумішей. За раціональний склад ґрунтобетону прийняли той, зразки з якого показали найвищі значення міцності за стиску. Як в'язуче застосували цемент марки М500 виробництва АТ «Подільський цемент» (м. Кам'янець-Подільський). Ґрунт – суглинок. Визначення фізико-механічних властивостей ґрунту виконували відповідно до [1].

Запроектвані три склади № 1, 2 та 3 з масовим вмістом в'язучого в ґрунтоцементній суміші 20 %, 17 % та 15 % відповідно. З кожного складу виготовлено по 3 зразки-куби розмірами 70 × 70 × 70 мм (0).



a



б



в

Рис. 2. Зразки ґрунтобетону: а – в процесі виготовлення; б – після розпалублення; в – у віці 28 діб

Метод виготовлення зразків – віброущільнення на лабораторній

віброплощині. Спосіб витримки зразків – нормальні умови. Температура повітря під час виготовлення та витримки зразків складала 18...22 °С, вологість – 75...85 %. Протягом трьох-п'яти діб зразки витримували у формах, після розпалублення поміщали в камеру нормального тверднення на решту терміну до 28 діб.



У встановлений термін готові зразки випробували на міцність на стиск на гідравлічному пресі УММ-20 відповідно до [2]. Загальний вигляд зразків після випробування показаний на 0. Характер руйнувань зразків повністю відповідає руйнуванню для бетонних кубів.



Рис. 3. Випробувані на стиск зразки ґрунтобетону

Міцність на стиск зразків-кубів визначали відповідно до [3]. Результати випробувань на міцність наведені в таблиці 1. За результатами визначення міцності можна зробити висновок, що оптимальною виявилась суміш № 1 із масовим вмістом в'язучого в ґрунтоцементній суміші 20 %.

Таблиця 1

Результати випробувань зразків ґрунтобетону

№	Площа, (см ²)	Руйнівне зусилля, (кН)	Масштабний коефіцієнт	Міцність, МПа
1 ₁	48,63	39,9	0,85	7,0
2 ₁	47,84	35,0	0,85	6,2
3 ₁	47,83	22,5	0,85	4,0

Для збільшення міцності ґрунтобетону, а також враховуючи, що щебінь або гравій – це традиційно обов'язковий компонент бетонної суміші, прийнято рішення про введення в ґрунтобетонну суміш крупного заповнювача.

Враховуючи наявність великої кількості бетонного брухту, утвореного в результаті руйнувань та демонтажу пошкоджених внаслідок бойових дій в Україні будівель і споруд, доцільно розглянути варіант використання подрібнених бетонних відходів як крупного заповнювача ґрунтобетону.

Щебінь, отриманий в результаті подрібнення бетонного брухту (рециклінговий щебінь), являє собою двофазну систему, яка складається з натурального заповнювача (щебеню або гравію) та залишкового розчину, приклеєного до крупного заповнювача [8].

За результатами випробувань щебеню, отриманого після подрібнення бетонних зразків із відомими складами та різними міцностями на лабораторній шоківій дробарці зі складним обертанням, встановлено, що визначальний вплив на властивості рециклінгового щебеню має наявність саме залишкового розчину [10].

Візуальне обстеження окремих зерен відфракціонованого рециклінгового щебеню показало, що вміст залишкового розчину на зернах різних фракцій суттєво відрізняється. Майже 100 % зерен фракцій 10–20 мм містять і натуральний щебінь, і залишковий розчин. У переважній більшості вміст залишкового розчину по поверхні натурального щебеню становить менше 50 %. У фракції 5–10 мм деяка кількість зерен взагалі не має натурального щебеню, у великій кількості зерен вміст залишкового розчину на поверхні природного заповнювача значно перевищує 50 % (0).

Після відсіву дрібної фракції (менше 5 мм), визначення зернового складу, насипної та середньої густини зерен та випробувань щебеню на дробильність встановлено такі характеристики рециклінгового щебеню фракції 5–10 мм [10]:

- вміст фракції в суміші крупних фракцій (понад 5 мм) – 29...31%;
- насипна густина – 1,05...1,1 г/см³;
- середня густина зерен – 2,29...2,38 г/см³;
- дробильність – 16...21%.

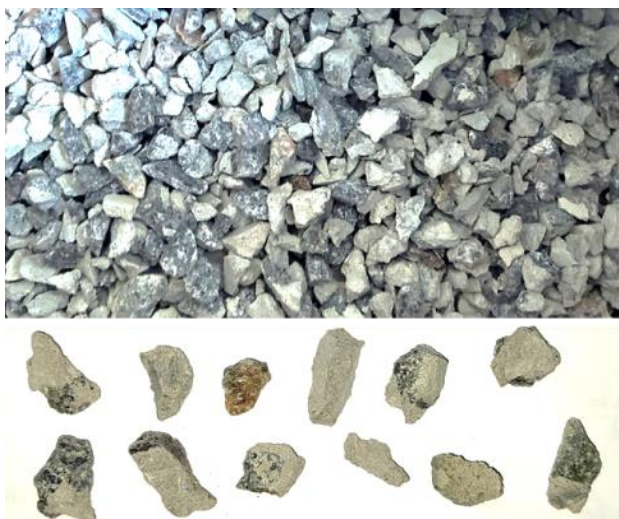


Рис. 4. Рециклінговий заповнювач крупністю 5–10 мм

Порівнюючи з аналогічними властивостями фракції 10–20 мм, можна встановити характерну особливість рециклінгового щебеню – погіршення фізико-механічних властивостей разом із зменшенням крупності фракцій. Це, очевидно, пов'язано зі збільшенням за масою вмістом залишкового розчину в менших фракціях. Крім того, враховуючи особливості процесу подрібнення в цоківій дробарці і руйнування більш крупних шматків здебільшого по розчину (як менш міцної фази в структурі рециклінгового щебеню), значна кількість зерен менших фракцій має увігнуту форму, що збільшує пористість і, як наслідок, зменшує щільність пакування зерен у фракції. Але у випадку ґрунтобетону з великим вмістом глинистого компонента (суглинку) цей недолік потенційно може сприяти кращому зчепленню ґрунтобетонної суміші та заповнювача.

Згідно з [4], найбільша крупність заповнювача має бути не більше 1/5 товщини плити, а також не більше 3/4 відстані від кінця нагеля до верхньої поверхні плити. Виходячи з



конструктивного рішення ґрунтобетонної плитної частини перекриття (розмір між кінцями нагелів та верхньою поверхнею плити становить 12...15 мм) визначено необхідну фракцію крупного заповнювача: 5...7,5 мм.

Для отримання зазначеної крупності виконано додаткове просіювання крізь сито з діаметром отворів 7,5 мм. Після чого, враховуючи зменшення крупності, уточнено фізичні властивості рециклінгового щебеню:

- насипна густина – 1,02 г/см³;
- середня густина зерен – 2,19 г/см³.

На другому етапі дослідження у визначений оптимальний склад ґрунтобетонної суміші вводили крупний заповнювач. Підготовлено три склади суміші із вмістом заповнювача по відношенню до маси суміші сухого ґрунту та цементу 10, 20 та 30 % (0). Спосіб виготовлення зразків-кубів та умови їх тверднення аналогічні до першого етапу дослідження.



Рис. 5. Виготовлення ґрунтобетонних зразків із використанням рециклінгового щебеню

Після тверднення протягом 28 діб аналогічно до першого етапу дослідження зразки-куби підлягали випробуванню на міцність за стиску на гідравлічному пресі УММ-20 (0). Характер руйнування відповідав руйнуванню традиційних кубів.



а

б



в

Рис. 6. Грунтобетонні зразки з рециклінговим щебнем після випробування на стиск:

а – з 10 % вмістом заповнювача; б – з 20 % вмістом; в – з 30 % вмістом

Результати випробувань зразків із рециклінговим заповнювачем наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати випробувань зразків грунтобетону з рециклінговим щебнем

№	Площа, (см ²)	Руйнівне зусилля, (кН)	Міцність, МПа	Середня густина, г/см ³
1	45,56	23,7	4,4	1,64
2	47,49	23,8	4,3	1,72
3	47,26	30,72	5,5	1,75

Очікувано найбільша міцність, як і середня густина грунтобетону, зафіксована в зразках із масовим вмістом заповнювача 30 %. Але в цілому в ході випробувань встановлено, що міцність грунтобетонних зразків із використанням рециклінгового щебеню фракції 5...7,5 мм як заповнювача менша, ніж у грунтобетонних зразках без заповнювача.

Висновки

За результатами випробувань грунтобетонних зразків оптимального складу з додаванням крупного заповнювача з подрібненого бетону встановлено, що навіть пориста структура заповнювача, його кутастисть та шорсткість не дозволяють забезпечити достатнє зчеплення в

контактній зоні між щебнем та глинистим ґрунтом. Потенційно міцність грунтобетону з крупним заповнювачем можна збільшити за рахунок збільшення міцності заповнювача, але, як показують інші дослідження авторів [8; 10], у випадку використання рециклінгового щебеню це можливо лише за рахунок збільшення крупності фракції. В умовах прийнятої конфігурації деревогрунтобетонної плити цього досягти неможливо.

Отже, в цілому, можна зробити висновок, що введення в грунтобетонну суміш натурального або рециклінгового заповнювача збільшує неоднорідність усієї суміші, що негативно впливає на міцність готових виробів.

Враховуючи особливості роботи ребристого покриття для подальших досліджень та натурних випробувань, доцільно прийняти комбіновану систему бетонування плити, а саме в стиснутій зоні ребра використовувати традиційний важкий бетон, а у звисах – грунтобетон без заповнювача. В такому випадку одним із варіантів заповнювача для важкого бетону може бути рециклінговий щебінь необхідної крупності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. надано чинності 2009.12.22. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 32 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Чинний від 2010.09.01. Вид. офіц. Київ, 2010.
3. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності. Чинний від 2010.09.01. Вид. офіц. Київ, 2010.

4. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Чинний від 2014.07.01. Вид. офіц. Київ, 013.
5. Попович О., Захарко Я., Мальований М. Проблеми утилізації та переробки будівельних відходів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2013. № 755. С. 321–324.
6. Порядок виконання робіт з демонтажу об'єктів, пошкоджених або зруйнованих внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 р. № 474.
7. Порядок поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків : Постанова Кабінету Міністрів України від 27.09.2022 р. № 1073.
8. Савицький М. В., Смирнов А. С. Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. *Український журнал будівництва та архітектури*. № 6 (018). 2023. С. 111–117. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013>
9. Facebook. URL: https://www.facebook.com/MinregionUkraine/posts/pfbid0r_JGskspLRGADAFGQ5e6DzwP5vesGtn4P5tZWMD1KL7symp4nKeYskrhWnsnUJyXl (дата звернення: 16.11.2023).
10. Smyrnov A.S., Savytskyi M. V., Myslytska A. O. Properties of Recycled Coarse Aggregates Made of Concrete Waste. Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України : матер. наук.-практ. конф. Дніпро, 13.03.2024 р. С. 12–15. URL: <https://doi.org/10.30838/978-966-3232-50-8>

REFERENCES

1. *DSTU B V.2.1-17:2009. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia fizychnykh vlastyvostei* [DSTU B V.2.1-17:2009. Foundations of Buildings and Structures. Soils. Methods of Laboratory Determination of Physical Properties]. Kyiv : Minregionbud Publ., 2010, 32 p. (in Ukrainian).
2. *DSTU B V.2.7-214:2009. Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy* [DSTU B V.2.7-214:2009. Building Materials. Concretes. Methods for Determining Strength Using Control Samples]. Kyiv, 2010. (in Ukrainian).
3. *DSTU B V.2.7-224:2009. Betony. Pravyla kontroliu mitsnosti* [DSTU B V.2.7-224:2009. Concretes. Strength Control Rules]. Kyiv, 2010. (in Ukrainian).
4. *DSTU-N B V.2.7-299:2013. Nastanova shchodo vyznachennia skladu vazhkoho betonu* [DSTU-N B V.2.7-299:2013. Guidelines for Design the Mixture of Heavy Concrete]. Kyiv : SE “State Research Institute of Building Constructions” Publ., 2013. (in Ukrainian).
5. Popovych O., Zakharko Ya. and Maliovanyy M. *Problemy utylizatsii ta pererobky budivelnnykh vidkhodiv* [Problems of Disposal and Processing of Construction Waste]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhniky”: Teoriia i praktyka budivnytstva* [Bulletin of the National University “Lviv Polytechnic”: Theory and Practice of Construction]. 2013, vol. 755, pp. 321–324. (in Ukrainian).
6. *Poriadok vykonannya robot z demontazhu ob'ektiv, poshkodzhennykh abo zruinovanykh vnaslidok nadzvychainnykh sytuatsii, voiennykh dii abo terorystychnykh aktiv* [The procedure for dismantling objects damaged or destroyed as a result of emergency situations, military operations or terrorist acts]. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 19, 2022, no. 474. (in Ukrainian).
7. *Poriadok povodzhennia z vidkhodamy, shcho utvorylys u zv'iazku z poshkodzhenniam (ruinuvanniam) budivel ta sporud vnaslidok boiovykh dii, terorystychnykh aktiv, dyversii abo provedenniam robot z likvidatsii yikh naslidkiv* [The Procedure for Handling Waste Resulting from the Damage (Destruction) of Buildings and Structures Due to Armed Conflict, Terrorist Acts, Sabotage, or the Implementation of Works to Eliminate Their Consequences]. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated September 27, 2022, no. 1073. (in Ukrainian).
8. Savytskyi M.V. and Smyrnov A.S. *Osoblyvosti vykorystannia podribnenoho betonnoho brukhtu v yakosti krupnoho zapovniuvacha dlia betonu* [Features of Using Crushed Concrete as a Coarse Aggregate for Concrete]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. No. 6 (018), 2023, pp. 111–117. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013>. (in Ukrainian).
9. Facebook. URL: <https://www.facebook.com/MinregionUkraine/posts/pfbid0rJGskspLRGADAFGQ5e6DzwP5vesGtn4P5tZWMD1KL7symp4nKeYskrhWnsnUJyXl> (date of access : 16.11.2023).
10. Smyrnov A.S., Savytskyi M.V. and Myslytska A.O. Properties of Recycled Coarse Aggregates Made of Concrete Waste. *Prosuvannia enerhoefektyvnosti ta pidhotovka fakhivtsiv dlia vidbudovy Ukrainy : Materialy naukovo-praktychnoi konferentsii* [Promotion of energy efficiency and training of specialists for the reconstruction of Ukraine : materials of the scientific and practical conference]. Dnipro, 13.03.2024, pp. 12–15. URL: <https://doi.org/10.30838/978-966-3232-50-8> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.03.2024.

УДК 72.01:001.18:004

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.106.1049

ВПЛИВ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПРОЦЕС АРХІТЕКТУРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

ХАРЧЕНКО К. С.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ТОВСТИК Т. М.², доц.,
ДЬЯКОНОВ Д. М.³, здобувач

^{1*} Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-93-37, e-mail: design@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

² Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-93-37, e-mail: design@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5980-4543

³ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (056) 756-93-37, e-mail: design@pdaba.edu.ua

Анотація. *Постановка проблеми.* Комп'ютерні технології стають все більше популярними в архітектурній галузі і їх використання може мати як позитивні, так і негативні наслідки. Розвиток комп'ютерних технологій суттєво змінив підхід до проектування в архітектурі. Проте залежність від комп'ютерних технологій може спричинити втрату вмінь аналізувати та проектувати об'єкти архітектури самостійно. *Мета статті* – проаналізувати вплив комп'ютерних технологій на архітектуру та оцінити перспективу цього впливу в майбутньому. *Висновок.* Сьогодні комп'ютерні технології використовуються скрізь. Розвиток технологій моделювання та будівництва забезпечує нові можливості у сфері архітектури. Використання комп'ютерних технологій на всіх етапах будівництва дозволяє архітекторам створювати все складніші проекти з високою точністю та ефективністю. Застосування нових технологій у сфері архітектури дозволить забезпечувати більш комплексний підхід до проектування, який може охоплювати більше необхідних характеристик. Генеративний дизайн може бути використаний, щоб забезпечити більш ефективний та точний процес проектування. Віртуальна та доповнена реальність (VR та AR) надають широкий спектр можливостей для проектування, моделювання архітектурних об'єктів. За допомогою BIM-технологій створюється інформаційна модель, яка забезпечує точне бачення проєкту в цілому. Важлива складова цієї технології – єдиний інформаційний простір, база даних. Штучний інтелект може створювати тисячі варіантів будівель. Питання, як більш раціонально використовувати ресурси (часові, матеріальні, людські), стало одним із ключових питань сучасності. Комп'ютерні технології допомагають вирішувати ці проблеми та винаходити нові методи проектування та будівництва архітектурних об'єктів. Україна, як одна з найбільше диджиталізованих країн світу, швидко впроваджує новітні технології в робочі процеси проектування, що викличе позитивні зміни архітектурного іміджу держави.

Ключові слова: комп'ютерна графіка; параметричне моделювання; віртуальна реальність; доповнена реальність; генеративний дизайн; BIM-технології

THE INFLUENCE OF THE DEVELOPMENT OF COMPUTER TECHNOLOGIES ON THE PROCESS OF ARCHITECTURAL DESIGN

KHARCHENKO K.S.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
TOVSTYK T.M.², Assoc. Prof.,
DIAKONOV D.M.³, Recipient of a Scientific Degree

^{1*} Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-93-37, e-mail: design@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

² Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-93-37, e-mail: design@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5980-4543

³ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-93-37, e-mail: design@pdaba.edu.ua

Abstract. Problem statement. Computer technology is becoming increasingly popular in the architectural field, and its use can have both positive and negative consequences. Computer modeling allows architects to create and analyze designs faster and more accurately, which improves the quality and efficiency of construction. The development of computer technologies has significantly changed the approach to design in architecture. However, dependence on computer technologies can lead to the loss of the ability to analyze and design architectural objects independently. **Purpose of the article.** To analyze the impact of computer technology on architecture and to assess the perspective of this impact in the future. **Conclusion.** Today computer technology is used everywhere. The development of modeling and construction technologies provides new opportunities in the field of architecture. The use of computer technology at all stages of construction allows architects to create increasingly complex projects with high accuracy and efficiency. The use of new technologies in the field of architecture will allow to provide a more complex approach to design, which can cover more characteristics necessary to take into account. Generative design can be used to provide a more efficient and accurate design process. Virtual and augmented reality (VR and AR) provide a wide range of opportunities for designing and modeling architectural objects. With the help of BIM technology, an information model is created, which provides an accurate vision of the project as a whole. An important component of this technology is a single information space, a database. Artificial intelligence can create thousands of building options. The question of how to use resources more rationally (time, material, human) is one of the key issues of our time. Computer technologies help solve these problems and invent new methods of designing and building architectural objects. Ukraine, as one of the most digitized countries in the world, is rapidly introducing the latest technologies into the design work processes, which will lead to positive changes in the state's architectural image.

Keywords: *computer graphics; parametric modeling; virtual reality; augmented reality; generative design; BIM-technologies*

Постановка проблеми. З розвитком суспільства архітектура не може стояти на місці. Технологічний розвиток дає нові можливості людству та одразу створює нові проблеми для суспільства. Архітектори сучасності повинні передбачати можливі наслідки своїх проєктів та їх вплив на людей. Трансформація свідомості під тиском новітніх технологій відбувається дуже швидко, тому архітектура повинна бути максимально гнучкою для забезпечення потреб сьогодення.

Наразі неможливо уявити сучасні сфери життєдіяльності людини без використання комп'ютерних технологій. Їх розвиток має також і значний вплив на архітектурну діяльність. Проєктування за допомогою комп'ютерного моделювання дозволяє архітекторам створювати більш складні й точні моделі, які можуть виконувати все більш комплексні завдання. Проте велика залежність від комп'ютера може спричинити втрату креативності та вмінь самостійної роботи архітектора та певної складності у взаємодії людини з пристроєм.

Використання новітніх технологій може спричинити й низку етичних проблем, пов'язаних із розвитком штучного інтелекту.

Аналіз публікацій. Аналіз статей, присвячених комп'ютерним технологіям в архітектурі, доводить, що розвиток будівництва тісно пов'язаний з еволюцією технологій. Цифрові технології дозволяють архітекторам та іншим проєктним командам знизити витрати на проєктування та будівництво, зменшити час виконання проєктів та поліпшити якість продукту. Зростання складності проєктів та необхідність швидкого та точного моделювання будівельних конструкцій якраз і забезпечується за допомогою комп'ютерних програм та технологій [1; 5; 7].

Створення точних 3D-моделей будівель та споруд дає змогу досліджувати майбутні будови та діагностувати й виправляти помилки допущені в моделюванні задовго до початку будівельних робіт. Комп'ютерні технології дозволяють створювати віртуальні макети будівель та споруд, за допомогою цього

з'являється можливість виконувати тестування та аналізувати можливі наслідки природних катастроф, таких як землетруси та урагани [2; 5; 7].

Зростання чисельності населення міст ставить нові вимоги для архітекторів. Застосування передових комп'ютерних технологій в міському плануванні значно поліпшує процес проектування й аналізу раціональності містобудівних рішень. Впровадження цифрових технологій в архітектурну діяльність зменшує час та витрати на створення складних та більш комплексних проєктів. Комп'ютерні технології – це необхідний та невід'ємний елемент у сучасному проектуванні та реалізації архітектурних споруд [4].

Застосування спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє створювати симуляції фізичних явищ та умов, дослідження яких дозволяє проектувати більш енергоефективні та комфортні умови для людей. Енергоефективність як одна з критичних характеристик кожного майбутнього архітектурного проєкту потребує більш прискіпливого вивчення та використання комп'ютерних програм для аналізу проєкту під різними кутами з метою оптимізації енергетичної ефективності об'єкта.

Комп'ютерні технології, які допомагають архітекторам-практикам, також відіграють ключову роль у навчанні молодих архітекторів. Упровадження цифрових технологій в архітектурному навчанні може допомогти студентам краще усвідомити інтерактивний процес проектування та розроблення будівельних конструкцій, а також підготувати їх до використання сучасних технологій у практичній діяльності [2; 8].

Мета статті – аналіз комп'ютерних технологій як інструментів архітектурного проектування; дослідження доцільності та рентабельності застосування цих методів у реальному проектуванні.

Результати досліджень. Комп'ютерні технології значно впливають на архітектуру будівель та споруд. Застосування їх в архітектурі дає

можливість прискорити процес проектування та скоротити витрати на розроблення проєктів. Це дозволяє архітекторам та інженерам краще візуалізувати та подавати свої ідеї у цифровому форматі, що суттєво полегшує їх розуміння та спілкування з клієнтами, замовниками та підрядниками.

Використання можливостей комп'ютерної техніки в архітектурній діяльності має безліч видів застосування від креслень до віртуальної реальності. Пізнання можливостей комп'ютерного світу в усіх його проявах дає сучасним архітекторам безліч можливостей для створення проєктів.

Один із найяскравіших прикладів застосування комп'ютерної графіки в архітектурі – використання тривимірних моделей для проектування будівель. За допомогою таких моделей можна створювати детальні та реалістичні зображення будівель, що дозволяє архітекторам та замовникам краще розуміти їх зовнішній вигляд та функціональність. Це дозволяє швидко оцінити можливі зміни та коригування проєкту [1; 5].

Ще одним прикладом застосування комп'ютерної графіки в архітектурі стало використання віртуальних реалістичних моделей будівель. Це дозволяє архітекторам та замовникам пройтися по будівлі у віртуальному просторі та оцінити її зовнішній вигляд, внутрішнє облаштування та зручність використання. Такі моделі можуть бути використані для презентацій проєктів, навчання та доповненої реальності (рис. 1). Крім того, комп'ютерна графіка дозволяє створювати симуляції, які можуть допомогти архітекторам та інженерам визначити оптимальне розташування будівлі на ділянці, вибрати найбільш ефективну систему вентиляції та освітлення, а також установити відповідність проєкту стандартам енергоефективності та безпеки.

Загалом комп'ютерна графіка дозволяє архітекторам та інженерам значно підвищити якість своїх проєктів,

прискорити процес їх розроблення, скоротити витрати та зробити проектування більш доступним для широкої аудиторії.

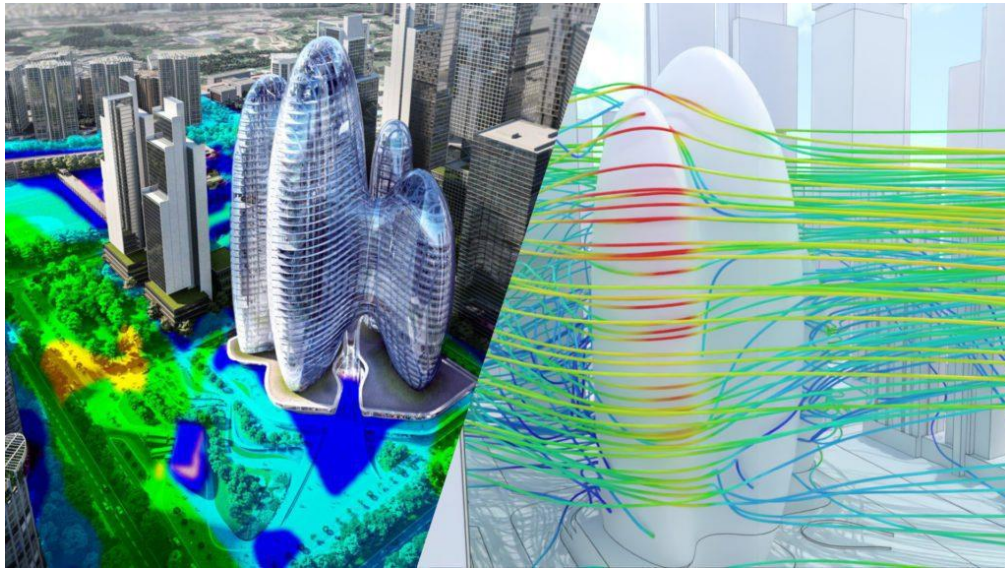


Рис. 1. Результати моделювання вітрового потоку навколо будівлі штаб-квартири OPPO. Zaha Hadid Architects

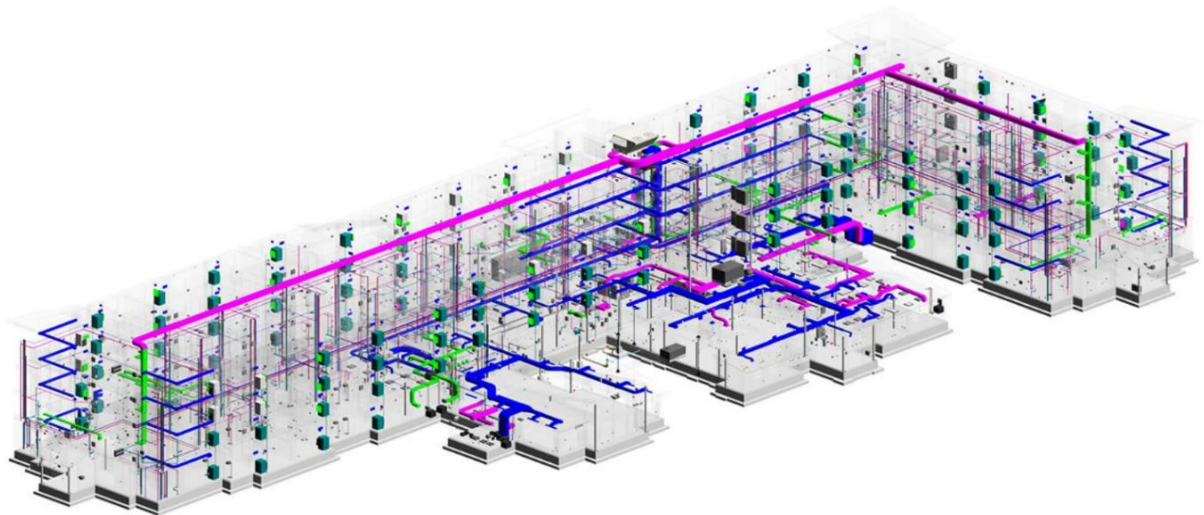


Рис. 2. Знімок BIM-моделі з проєкту в Північній Кароліні. United-BIM

Інформаційне моделювання будівлі – це технологія оптимізації процесів проектування і будівництва, в основі якої лежить використання єдиної моделі будівлі й обмін інформацією щодо будь-якого об'єкта між усіма учасниками, протягом усього життєвого циклу – від задуму власника і перших начерків архітектора до технічного обслуговування готового будинку.

Building information modeling (BIM) – це числове подання та належним чином

організована інформація про об'єкт, яка використовується на всіх етапах його життєвого циклу. За допомогою BIM-технології створюється інформаційна модель, яка забезпечує точне бачення проєкту в цілому (рис. 2).

Важлива складова цієї технології – єдиний інформаційний простір, база даних, що містить усю інформацію про технічні, правові, майнові, експлуатаційні, енергетичні, екологічні, комерційні та інші характеристики об'єкта будівництва.

Завдяки високій точності та детальному опису моделі, ця технологія дає можливість проводити різні розрахунки (наприклад, енергоефективність та енергоспоживання будівлі, комплексні розрахунки на довготривалість, вогнестійкість та міцність як усієї будівлі, так і її окремих елементів) та аналіз отриманих результатів [1].

Передумовою для еволюції автоматизованого проектування стала потреба організації ефективної роботи з величезними масивами цифрової інформації, які швидко виникають. З'явилися нові класи систем, призначені для організації та координації робіт інженерного персоналу – системи управління даними про виріб (PDM – Product Data Management) і електронні архіви. Усе це в сукупності лягло в основу

концепції управління життєвим циклом виробу – PLM (Product Lifecycle Management). В основі технології BIM лежить концепція об'єктно орієнтованого проектування (моделювання) будівель у визначеному параметричному просторі. І це параметричне моделювання стало однією з тих принципових особливостей, які відрізняють BIM-програми від усіх інших CAD-систем проектування.

Параметричний простір (Parametric Space) – це простір, у якому визначаються всі параметри, що використовуються у створенні параметричної моделі (рис. 3). У параметричному просторі кожен параметр має певне значення, яке визначає форму та властивості об'єкта. Параметри можуть бути пов'язані один з одним, що дозволяє змінювати один параметр та автоматично змінювати інші параметри.

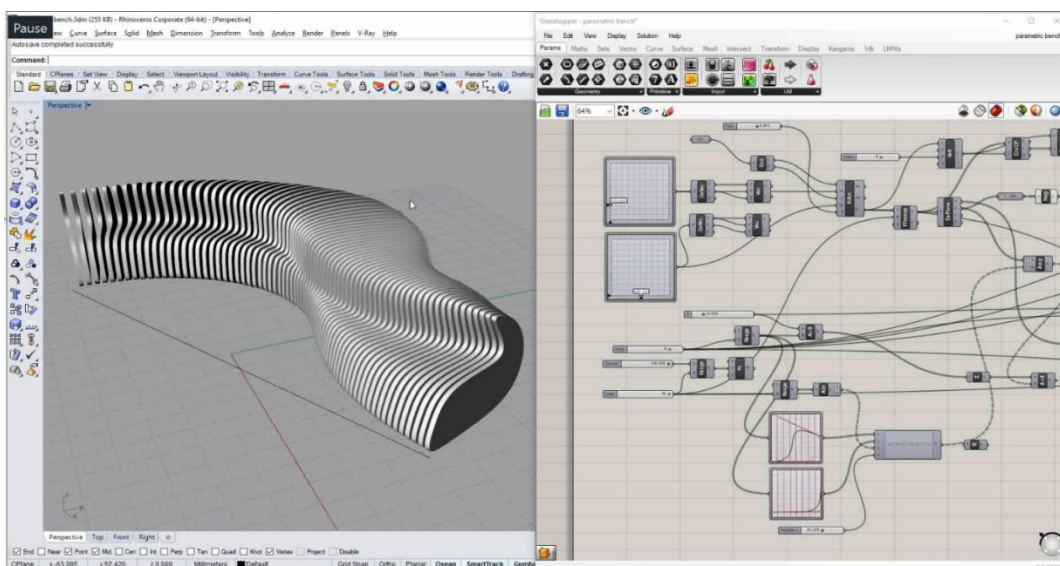


Рис. 3. Приклад моделювання у параметричному просторі, за допомогою програм Rhinoceros & Grasshopper

У параметричному просторі використовуються математичні функції, які визначають зв'язок між параметрами та дозволяють змінювати форму об'єкта при зміні параметрів. Наприклад, якщо ми розглядаємо параметричну модель будівлі, параметричний простір може включати такі параметри як висота, ширина, глибина, розташування вікон і дверей, товщина стін тощо. Якщо ми змінюємо один із параметрів, наприклад, висоту будівлі, всі інші параметри будуть

автоматично змінені відповідно до нового значення.

Параметричний простір може бути представлений у вигляді графічного інтерфейсу, де користувач може змінювати значення параметрів та бачити, як це впливає на форму об'єкта. Також параметричний простір може бути використаний для створення генеративних алгоритмів, які можуть автоматично створювати параметричні моделі на основі заданих параметрів.

Загалом, параметричний простір дозволяє архітекторам і дизайнерам створювати складні параметричні моделі, які можуть бути швидко і легко змінені, щоб враховувати вимоги та умови, які змінюються. Це дозволяє створювати більш ефективні та гнучкі проекти, які можуть бути адаптовані до різних умов та потреб [3].

Параметрична архітектура – це унікальний стиль, в якому взаємопов'язані такі поняття як скульптура, математика, архітектура. Цей стиль спрямований на створення певної моделі, що виходить за рамки простих форм і конструктивних рішень. Даний вид архітектури набув популярності з розвитком передових параметричних дизайнерських систем.

Параметризм на даний момент – найважливіший і домінуючий стиль в авангардистській практиці, що вимагає масштабності у всіх сферах, починаючи від архітектури і дизайну інтер'єру до великомасштабного міського дизайну. Для створення і проектування параметричної архітектури використовують нові сучасні комп'ютерні програми, які дозволяють не тільки параметрично моделювати, а і розробляти математичні алгоритми, логічні умови, що дозволяють знайти оптимальне розв'язання задачі в автоматичному режимі, розширює можливості для створення складних форм і структур.

Параметричні методи дозволяють працювати в реальному часі з найактуальнішими даними. Параметричний метод проектування базується на створенні алгоритмів середовища з використанням змінних параметрів. Надалі застосування цих алгоритмів дозволяє вирішити безліч питань, які або не вирішуються, або дуже трудомісткі за використання традиційного проектування.

Розвиток нових методів стає фундаментальною умовою для майбутнього успіху. Новий спосіб проектування розвивається завдяки не тільки технології, а і новому програмному забезпеченню, яке зробило параметричне

проектування доступним для архітекторів [5].

Генеративний дизайн – це підхід до дизайну, який використовує алгоритми та обчислювальну потужність для автоматичної генерації дизайнів, заснованих на заданих параметрах та обмеженнях.

Це дозволяє створювати складні форми, які нелегко створити вручну, а також досліджувати більш широкий діапазон дизайнів. У генеративному дизайні зазвичай використовуються алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту.

Генеративний дизайн може бути використаний в архітектурному проектуванні, щоб забезпечити більш ефективний та точний процес проектування. Генеративний дизайн може бути використаний для створення широкого спектра дизайнів, які можуть бути оцінені з точки зору ефективності, ергономіки, стилістики та інших параметрів [6].

Застосування генеративного дизайну може допомогти архітекторам та дизайнерам розробляти проекти швидше та ефективніше, зменшуючи кількість часу на етап концептуального планування.

Зазвичай програми використовуються тільки як інструменти, але в генеративному дизайні вони повноцінні учасники творчого процесу. Це не означає, що програма може обійтися без участі людини — над проектом все одно повинен працювати досвідчений інженер (рис. 4).

Створення рішення за допомогою генеративного дизайну відбувається так: проектувальник дає програмі технічне завдання: перераховує обмеження, позначає перешкоди та кріпильні елементи. На базі цих обмежень програма генерує варіанти вирішення. Людина вибирає із запропонованих програмою варіантів оптимальний і за необхідності допрацьовує його.

Генеративний дизайн — приклад синергії людини та комп'ютерної програми. Тим, хто боїться розвитку

технологій через можливе повстання машин зі штучним інтелектом, треба придивитися до цього методу. Тут програми не змагаються з людьми за роботу, а допомагають формулювати

проміжні рішення. Формулювати технічне завдання, придумувати початкову ідею проекту і доводити його до ідеалу – привілей людини.

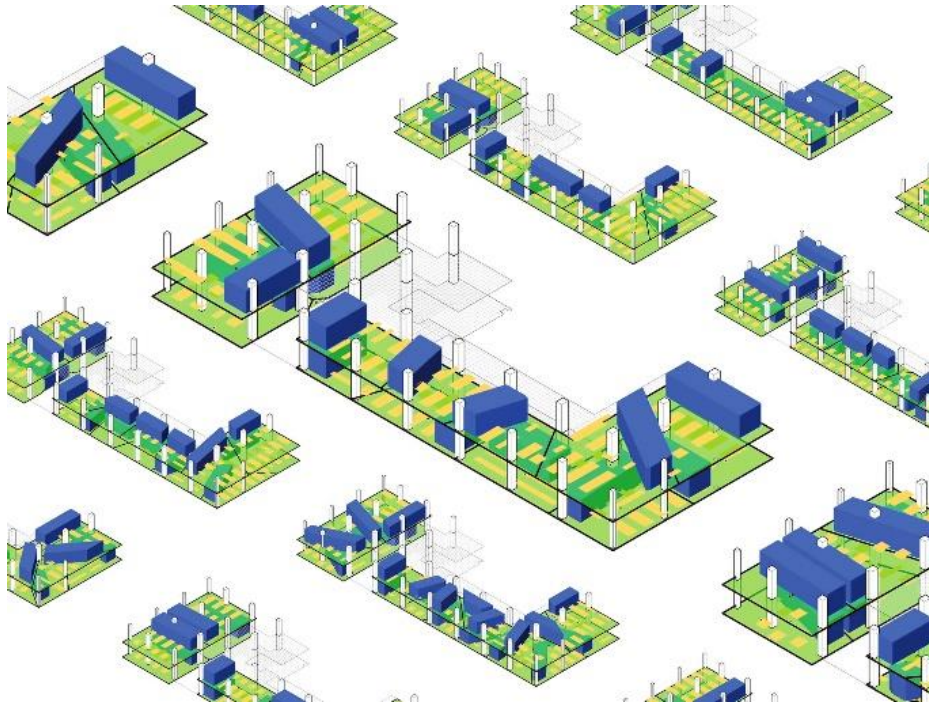


Рис. 4: Комп'ютерні ітерації дизайну для офісу та дослідницького приміщення в Торонто. Дослідження Autodesk

Рішення, зроблені за допомогою генеративного дизайну, нагадують природні форми, але допрацьовані та завершені. Користувачам результат такого підходу часто здається химерним на вигляд. Попри це, генеративний дизайн дає переваги виконавцю проекту і створює нову естетику [2; 6].

Віртуальна та доповнена реальність (VR та AR) надають широкий спектр можливостей для архітектури будівель та споруд:

- візуалізація проектів: VR та AR дозволяють архітекторам та клієнтам переглядати проекти будівель та споруд у тривимірному просторі. Це дозволяє краще розуміти та візуалізувати концепцію та дизайн проекту, а також робити зміни у режимі реального часу;

- тестування прототипів: VR та AR дозволяють тестувати прототипи будівель та споруд до початку будівництва. Це може допомогти виявити помилки в

дизайні та поліпшити його до початку будівництва;

- навчання: VR та AR можуть використовуватися для навчання архітекторів та будівельників нових технологій та методів будівництва. Також можна застосовувати VR та AR для навчання користувачів, як використовувати будівлі та споруди після їх зведення;

- продаж проектів: VR та AR можуть використовуватися для продажу проектів будівель та споруд клієнтам. Це дозволяє клієнтам глибше зануритися в проект і побачити, як він виглядатиме у реальному житті;

- ремонт та обслуговування: VR та AR можуть знадобитись для обслуговування та ремонту будівель та споруд. Наприклад, за допомогою VR та AR можна перевіряти та аналізувати стан будівлі та споруди до та після ремонту;

- проектування інтер'єру: VR та AR допоможуть у проектуванні інтер'єру будівель та споруд. Наприклад, за допомогою VR та AR можна побачити, як меблі будуть виглядати в кімнаті та які зміни потрібно внести, щоб поліпшити дизайн інтер'єру [8; 9].

У цілому, VR та AR дають архітекторам та будівельникам нові інструменти для поліпшення процесу проектування та зведення будівель та споруд. Ці технології можуть прискорити процес проектування, поліпшити якість та безпеку будівництва та заощадити час та гроші на всіх етапах проекту (рис. 5).

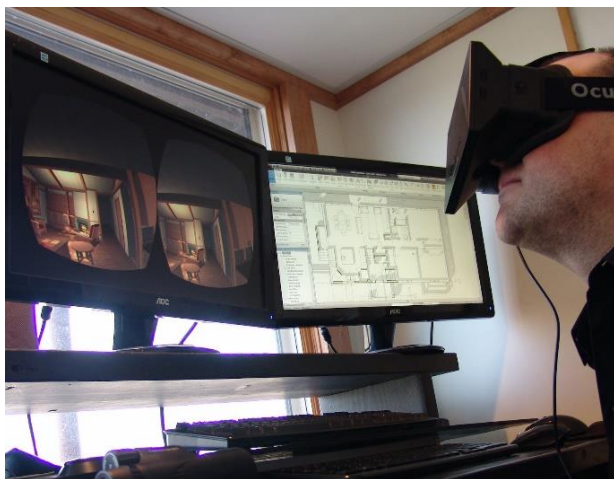


Рис. 5. Приклад використання віртуальної реальності у співпраці програм Revit та Unity

Технології VR та AR та візуалізації в реальному часі отримали додатковий розвиток завдяки індустрії відеоігор. Ігрові двигуни, такі як Unreal Engine та Unity, значно змінили підхід до візуалізації 3D-моделей у реальному часі. У процесі проектування архітектури ігрові двигуни дають змогу візуалізувати концепції та досліджувати їх у різних умовах. Це дозволяє архітекторам та клієнтам бачити проект у формі, яка більш жива та зрозуміла, що полегшує процес прийняття рішень

Ігрові двигуни також дозволяють ефективно створювати анімації та візуалізації будівельних проектів, що може бути корисно в процесі комунікації з іншими учасниками будівельного процесу [10].

Штучний інтелект.

Новітнім інноваційним інструментом для використання в архітектурному проектуванні став штучний інтелект. Він може допомагати архітекторам та створювати більш ефективні ергономічні будівлі за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Одна з головних переваг використання штучного інтелекту в архітектурному проектуванні – це можливість аналізувати великі обсяги даних та швидко знаходити оптимальні рішення. Штучний інтелект може створювати тисячі варіантів топологій будівель, заснованих на заданих параметрах, таких як розмір ділянки, планування та естетичні вимоги. Після генерації цих варіантів архітектор може відібрати найкращий варіант, враховуючи різні фактори, такі як ефективність та естетичність.

Крім того, штучний інтелект може допомогти архітекторам інтегрувати різні параметри та обмеження в проект, такі як безпека, енергоефективність та стійкість. Штучний інтелект може бути корисним в архітектурі та будівництві в багатьох випадках. Приклади:

Проектування будівель. Алгоритми машинного навчання можуть використовуватися для аналізу різних аспектів проекту, включаючи конструкційні параметри, економічні показники та безпеку.

Управління будівлями. Ресурс штучного інтелекту знадобиться для аналізу та прогнозування споживання, а також для моніторингу системи вентиляції та освітлення.

Штучний інтелект може допомогти керувати різними аспектами будівельного проекту, оцінювати витрати та ризики, а також моніторити робочі процеси та взаємодії між різними сторонами проекту.

За рахунок штучного інтелекту можна вибрати оптимальні матеріали для будівництва, враховуючи економічні та екологічні фактори [11].

Висновки

Розвиток комп'ютерних технологій суттєво змінив підхід до проектування в архітектурі. Впровадження цих технологій сьогодні дозволяє створювати складні інноваційні проекти, що не були можливі раніше. Застосування комп'ютерних можливостей забезпечує скорочення часу на проектування, збільшення продуктивності, поліпшення якості роботи та зменшення витрат. У результаті технології стають важливим інструментом для підвищення конкурентоспроможності в сучасному будівництві та архітектурі.

Генеративний дизайн може бути використаний, щоб забезпечити більш ефективний та точний процес проектування. Віртуальна та доповнена реальність (VR та AR) надають широкий спектр можливостей для проектування, моделювання архітектурних об'єктів. За допомогою BIM-технологій створюється інформаційна модель, яка забезпечує точне

бачення проєкту в цілому. Важливою складовою цієї технології постає єдиний інформаційний простір, база даних. Штучний інтелект може створювати тисячі варіантів будівель.

Однак використання цих технологій не бачиться безпроблемним, оскільки вимагає певних навичок та знань у галузі комп'ютерної науки та програмного забезпечення. Також застосування новітніх технологій може спричинити зниження ролі та значення ручної роботи в архітектурі та будівництві, що вплине на творчий процес та естетичний вимір проєктів.

У цілому, використання комп'ютерних технологій у сучасній архітектурі та будівництві має як переваги, так і недоліки. З урахуванням розвитку технологій та зміни попиту клієнтів, комп'ютерні технології стають невід'ємною частиною сучасного проектування та будівництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неминуца А. Ф., Сапужак І. Я. Allplan та Revit – дві альтернативи для роботи з BIM. *Proceedings of 10th International Science Conference NOCOTE'2012 : матер. X Міжнар. наук.-техн. конф.* (11–14 вересня, 2012). 2012. С. 41–43.
2. Барабаш М. С., Кір'язев П. М., Лапенко О. І., Ромашкіна М. А. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посіб., 2-е вид. Київ : НАУ, 2019. 492 с.
3. Малік Т. В., Ємець О. А. Використання параметричного дизайну в громадських інтер'єрах. *Теорія та практика дизайну. Культура і мистецтво*. 2022. Вип. 26. С. 167–172.
4. Остапенко С. О., Харченко К. С., Остапенко Л. С. Принципи формування інноваційного архітектурного середовища. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3. С. 114–122.
5. Сафронова О. О., Вишневська О. В. Сучасні комп'ютерні технології параметричного дизайну в громадському інтер'єрі. *Легка промисловість*. 2015. Вип. 4. С. 34–39.
6. Loris Barbieri, Maurizio Muzzupappa. Performance-Driven Engineering Design Approaches Based on Generative Design and Topology Optimization Tools : a comparative study. *Applied Scinces*. 2022. Vol. 142. Pp. 4–7.
7. Барабаш М. С., Козлов С. В., Медведенко Д. В. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій : навч. посіб. Київ : НАУ, 2012. С. 19–23, 34–38.
8. Журба М. А. Віртуальна реальність: різновекторні пошуки. *Гілея*. 2014. Вип. 86. С. 171–175.
9. Волинець В. О. Віртуальна, доповнена і змішана реальність: сутність понять та специфіка відповідних комп'ютерних систем. *Arts and cultural, educational practices*. May 2021. Vol. 37. Pp. 231–243.
10. Lilia Potseluyko, Farzad Pour Rahimian, Nashwan Dawood, Faris Elghaish, Aso Hajirasouli. Game-like interactive environment using bim-based virtual reality for the timber frame self-build housing sector. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 142. Pp. 6–11.
11. Київська К. І., Цюцюра С. В., Кулеба М. Б. Аналіз застосування штучного інтелекту в BIM-технологіях. *Управління розвитком складних систем*. 2020. Вип. 43. С. 98–101.

REFERENCES

1. Nemynuscha A.F. and Sapuzhak I.Ya. Allplan ta Revit – dvi alternatyvy dlia roboty z BIM [Allplan and Revit are two alternatives for working with BIM]. *Proceedings of the 10th International Science Conference NOCOTE'2012 : Materialy X Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. (11–14 veresnya, 2012)* [Proceedings of the 10th

International Science Conference NOCOTE'2012: materials X International science and technology conf. (September 11–14, 2012)]. 2012, pp. 41–43. (in Ukrainian).

2. Barabash M.S., Kiryazev P.M., Lapenko O.I. and Romashkina M.A. *Osnovy kompiuternoho modeliuvannia: navch. posibnyk* [Basics of computer modeling : training. Manual]. 2nd ed., Kyiv : NAU Publ., 2019, 492 p. (in Ukrainian).

3. Malik T. and Yemets O. *Vykorystannia parametrychnoho dyzainu v hromadskykh interierakh* [Use of parametric design in public interiors]. *Kultura i mystetstvo* [Culture and Art]. 2022, iss. 26, vol. 26, pp. 167–172. (in Ukrainian).

4. Ostapenko S.O., Kharchenko K.S. and Ostapenko L.S. [Principles of forming an innovative architectural environment]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 3, pp. 114–122. (in Ukrainian).

5. Safronova O.O. and Vyshnevska O.V. *Suchasni kompiuterni tekhnologii parametrychnoho dyzainu v hromadskomu interieri* [Modern computer technologies for parametric design in public interiors]. *Lehka promyslovist* [Light Industry]. Vol. 4, 2015, pp. 34–39. (in Ukrainian).

6. Loris Barbieri and Maurizio Muzzupappa Performance-Driven Engineering Design Approaches Based on Generative Design and Topology Optimization Tools : a comparative study. *Applied Scinces*. Vol. 142, February 2022, pp. 4–7.

7. Barabash M.S., Kozlov S.V. and Medvedenko D.V. *Kompiuterni tekhnologii proiektuvannia metalevykh konstruksii: navch. posib.* [Computer technologies for designing metal structures : training. manual]. Kyiv : NAU Publ., 2012, pp. 19–23, 34–38. (in Ukrainian).

8. Zhurba M.A. *Virtualna realnist : riznovektorni poshuky* [Virtual reality : multi–vectorial searches]. *Hilea* [Gilea]. 2014, vol. 86, pp. 171–175. (in Ukrainian).

9. Volynets Viktoriia. *Virtualna, dopovnena i zmishana realnist : sutnist poniat ta spetsyfika vidpovidnykh kompiuternykh system* [Virtual, augmented and mixed reality : the essence of concepts and special features of relevant computer systems]. *Arts and Cultural, Educational Practices*. Vol. 37, May 2021, pp. 231–243. (in Ukrainian).

10. Lilia Potseluyko, Farzad Pour Rahimian, Nashwan Dawood, Faris Elghaish and Aso Hajirasouli. Game-like interactive environment using bim-based virtual reality for the timber frame self-build housing sector. *Automation in Construction*. Vol. 142, October 2022, pp. 6–11.

11. Kyivska Kateryna, Tsiutsiura Svitlana and Kuleba Mykola. *Analiz zastosuvannia shtuchnoho intelektu v bim-tekhnologiiakh* [Analysis of application of artificial intelligence in BIM-technology]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system* [Management of Development of Complex Systems]. 2020, vol. 43, pp. 98–101. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.03.2024.

УДК 622.831.31:622.834

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.116.1050

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРИХОВАНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ В КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ЇХ РУЙНУВАННЯ

ЯВОРСЬКА О. О.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БАРАБАНОВ С. С.^{2*}, *маг., асп.*

¹ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (0562) 46-90-66, email: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38(0567) 56-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

Анотація. Постановка проблеми. В умовах надзвичайних ситуацій, які активуються динамічними впливами від вибухів, пожежами та землетрусами, необхідно проводити контроль стійкості об'єктів для оцінення їх придатності до подальшої експлуатації. **Мета дослідження** – забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд із застосуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості в будівельних конструкціях. **Методика.** Аналіз та узагальнення даних, комп'ютерне моделювання, експериментальні дослідження стійкості споруд віброакустичним методом. **Результати.** Розглянуті: втрата стійкості бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементів несних конструкцій; фактори ризику, які проявляються в поступовому ослабленні будівельних несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень. Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості пошкоджень у конструктивних елементах або швидкого зростання тріщин, які активізуються раптовим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів. Моделюванням процесу руйнування методом скінчених елементів встановлено, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель. Визначено основні параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами. У зв'язку з тим, що об'єктом досліджень стало часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), для оцінення ризиків втрати стійкості запропоновано дві основні групи факторів ризику. Перша група пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Інтегральний ризик втрати стійкості визначається шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групі. **Наукова новизна.** Подальший розвиток отримала методика ідентифікації прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд, яка відрізняється урахуванням параметрів віброакустичного контролю наслідків процесу руйнування і оцінкою ризиків втрати стійкості споруд. **Практична значимість.** Результати досліджень дозволяють удосконалити метод оцінення зміни структури середовища внаслідок виникнення спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу.

Ключові слова: безпека будівель і споруд; ризики втрати стійкості; віброакустичний контроль

IDENTIFICATION OF HIDDEN DAMAGE IN CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF BUILDINGS AND STRUCTURES TO REDUCE THE RISKS OF THEIR DESTRUCTION

YAVORSKA O.O.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BARABANOV S.S.^{2*}, *Master's degree, Postgrad. Student*

¹ Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (0562) 46-90-66, e-mail: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

^{2*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

Abstract. Problem statement. In emergency situations, which are activated by dynamic impacts from explosions, fires and earthquakes, it is necessary to monitor the stability of objects to assess their suitability for further operation. **Purpose of the study.** ensuring the safe operation of buildings and structures using methods, software and technical means for vibroacoustic monitoring of hidden damage in building structures. **Methods.** Analysis and generalization of data, computer modeling, experimental studies of the structures stability using the vibroacoustic method. **Research results.** Considered: loss of concrete stability, reinforced concrete, bricks and other elements of load-bearing structures; risk factors manifested in the gradual weakening of load-bearing building structures due to the accumulation of internal damage. Sudden loss of stability of structures occurs after the accumulation of a critical amount of damage in structural elements or the rapid growth of cracks, which are activated by the sudden unloading of extremely stressed structures as a result of any dynamic influences. By modeling the destruction process using the finite element method, it has been established that long before cracks on the surfaces of structures can be visually identified, zones of hidden damage can actively spread inside the wall structures of buildings. The main parameters for monitoring the condition of buildings and structures using visual and vibroacoustic methods have been determined. Due to the fact that the object of research is the partial destruction of buildings and structures (that is, not the root cause, but the consequences of the influence of a complex of negative main factors), two main groups of risk factors for assess the risks of stability loss have been proposed. The first group is associated with the detection of external structural damage identified by visual inspection methods. The second group is associated with the detection of hidden damage, the parameters of which are determined by the vibroacoustic method. The integral risk of stability loss is determined by comparing and selecting the maximum risk in the group. **Scientific novelty.** The methodology for identifying hidden damage in structural elements of buildings and structures has been further developed, which is distinguished by taking into account the parameters of vibroacoustic control of the destruction consequences and assessing the risks of the structures stability loss. **Practical significance.** The research results make it possible to improve the method for assessing changes in the structure of the medium as a result of the occurrence of observed and hidden systems of cracks using vibroacoustic monitoring.

Keywords: *safety of buildings and structures; risks of stability loss; vibroacoustic control*

Постановка проблеми. Сьогодні Україна стикається з безпрецедентними викликами щодо безпеки критичної інфраструктури, будівель та споруд. В умовах надзвичайних ситуацій, які активуються динамічними впливами від вибухів, пожежами та землетрусами, необхідно проводити контроль стійкості та розрахунки ризиків об'єктів для оцінення їх придатності до подальшої експлуатації.

Моніторинг стану конструкцій надає корисну інформацію про цілісність та працездатність конструкції. Критичним аспектом будь-якої методології оцінки стійкості будівель та споруд стала діагностика, яка включає виявлення пошкоджень, локалізацію, класифікацію типу пошкодження або кількісну оцінку. Для цих цілей застосовуються моделі та експериментальні методи [1–5].

Для превентивного оцінення стійкості та можливості подальшої експлуатації будівель і споруд необхідно застосовувати методи неруйнівного контролю.

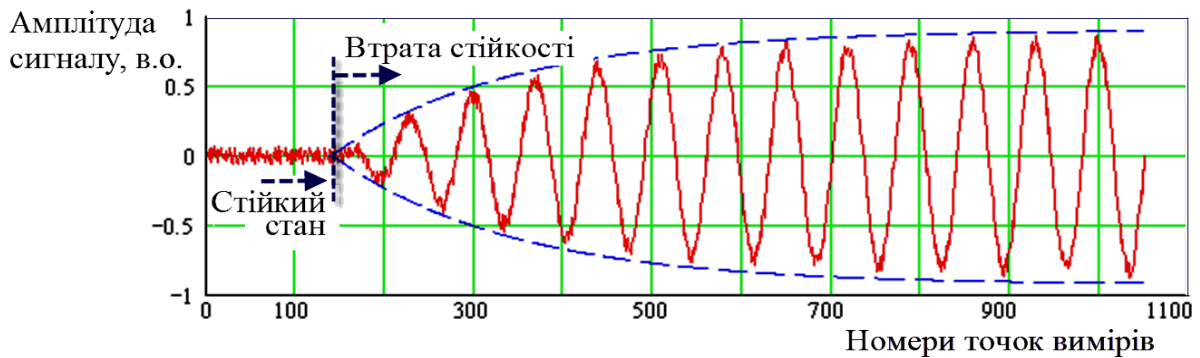
Для локалізації прихованих тріщин у товстих бетонних та інших монолітних конструкціях застосовуються методи віброакустичної діагностики [6–8].

Мета дослідження – забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд із

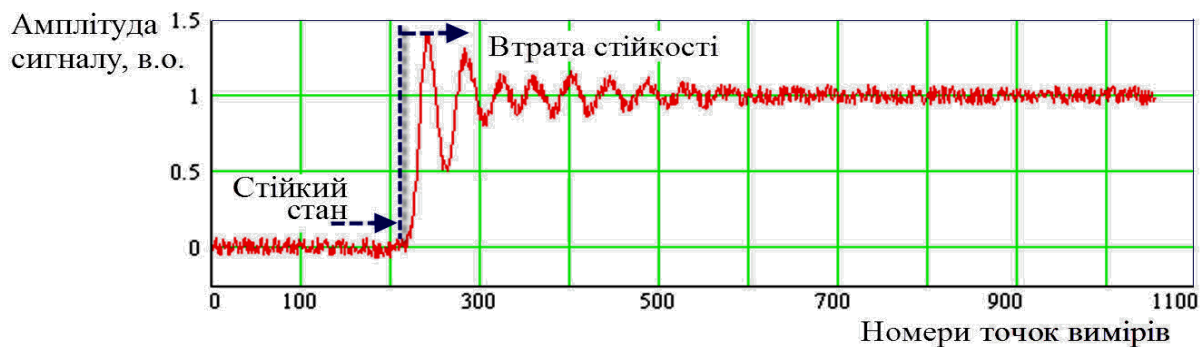
застосуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості в будівельних конструкціях.

Результати досліджень. Безпека експлуатації будівель та споруд в першу чергу залежить від виникнення та розвитку процесів руйнування в бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементах несних конструкцій. Залежно від ступеня пошкодження втрата стійкості може бути м'якою або жорсткою [9]. За «м'якою» втрати стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які часто пов'язані з допущеними під час проектування помилками, підтопленнями фундаментів або недотриманням правил експлуатації, що проявляються в поступовому ослабленні несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень.

У разі поступового ослаблення несних конструкцій через накопичення внутрішніх пошкоджень встановлюється коливальний періодичний режим, який супроводжується зростанням пошкодженості (кількості та величини тріщин) та на початковому етапі мало чим відрізняється від стану рівноваги (рис. 1, а).



a



б

Рис. 1. Зміна динамічної поведінки елементів будівель і споруд у процесі втрати стійкості: а – поступове ослабленні несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень; б – раптове розвантаження гранично-напружених конструкцій

Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості пошкоджень конструктивних елементів або раптового швидкого зростання тріщин, які активізуються зсувами основ будівель під час землетрусів або раповим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів.

Динамічні впливи можуть бути малої потужності (розриви іржавої арматури, наслідки пожеж) або потужними (перша хвиля або афтершоки землетрусів, що повторюються, вибухові хвилі). Впливи великої потужності особливо небезпечні через їх слабку прогнозованість та трагічні наслідки. Це спричиняє лавиноподібні обвалення конструкцій будівель, що втратили опору в результаті руйнування одного з поверхів.

У разі раптового розвантаження (за межею міцності) гранично-напружених конструкцій будівель і споруд втрата стійкості відбувається стрибком, коли

система переходить із стаціонарного режиму рівноваги в інший, як правило, коливальний періодичний режим, що встановився, але на іншому енергетичному рівні (рис. 1, б).

Слід зазначити, що за всіх типів втрата стійкості конструктивних елементів може відбуватися і без суттєвих візуально визначених пошкоджень. Тому для безпечної експлуатації будівель та споруд вирішальним стає не лише візуальне обстеження, а й своєчасний контроль прихованої пошкоженості та тріщинуватості в конструктивних елементах.

Утворення тріщин в елементах будівель і споруд відбувається внаслідок крихкого руйнування на мікро- або макрорівні. Тріщини відриву розвиваються у напрямі, перпендикулярному розтягуванню матеріалу. В результаті розвитку мікротріщин утворюються тріщини сколювання, які орієнтуються в напрямку максимального дотичного напруження під кутом до осі стиснення або розтягування.

Пошкодженість елементів конструкцій відбувається шляхом зростання мережі мікротріщин з формуванням областей непружних деформацій і магістральних тріщин.

Моделювання процесу руйнування методом скінченних елементів переконливо показало (рис. 2), що задовго до того, як

тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель і споруд (для розрахунків використано обчислювальний комплекс «GEO-RS» [4]).

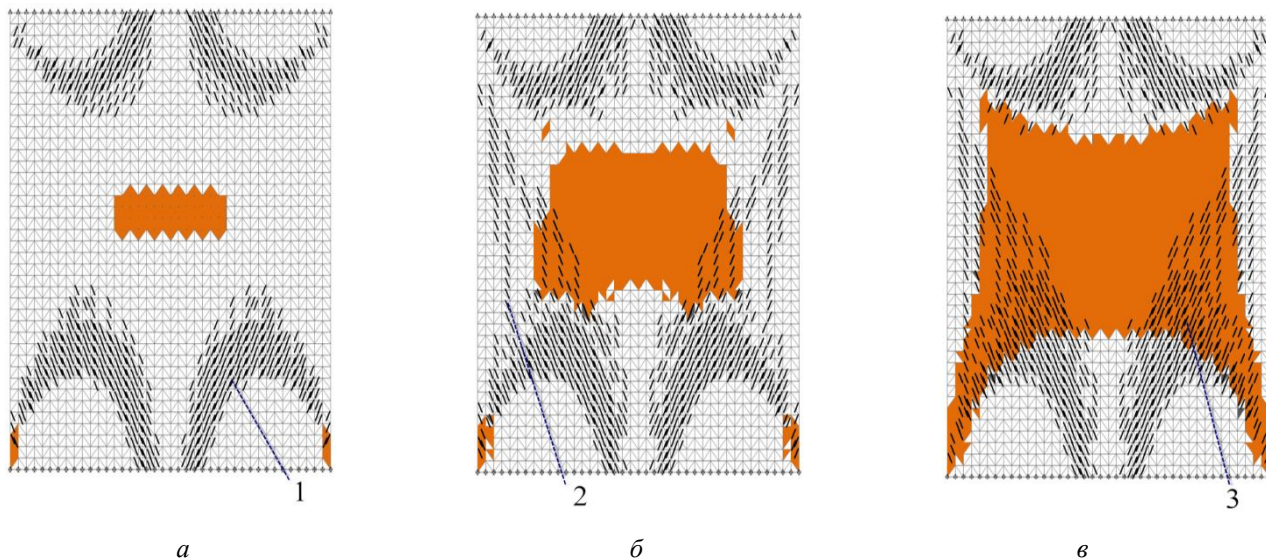


Рис. 2. Процес утворення тріщин у стінових конструкціях будівель і споруд при зростанні навантаження (а–в) за даними математичного моделювання напружено-деформованого стану: 1 – зони формування орієнтованих мікротріщин; 2 – об'єднання мікротріщин у спрямовані магістральні тріщини; 3 – об'єднання мікротріщин у пошкодженій зоні (поява можливості поверхневого сколу в нижній частині споруди)

Для превентивного оцінення стійкості будівель та споруд запропоновано віброакустичний метод контролю тріщинуватості та пошкодженості їх конструктивних елементів.

Основна особливість неруйнівного контролю полягає в тому, що він не повинен змінювати (погіршувати) вихідні механічні властивості об'єкта, тому силу удару підбирають мінімальною, для якої ударну хвилю можна вважати пружною. Однак цієї

енергії цілком достатньо для порушення коливальних у блокових структурах та будівельних конструкціях.

На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль (табл. 1), часу зіткнення та реальних розмірів дерев'яних, бетонних та металевих конструкцій цілісний об'єкт контролю можна віднести до системи з розподіленими параметрами, частково або повністю зруйнований – до систем із зосередженими параметрами [8].

Таблиця 1

Швидкості пружних хвиль у матеріалах будівель та споруд

Матеріал	Щільність $\rho \times 10^{-3}$, т/м ³	Швидкості хвиль v , м/с		Коефіцієнт Пуассона, μ	Модуль Юнга $E \times 10^{-10}$, Па
		поздовжніх	поперечних		
Бетон	2,3–2,5	3 800–4 400	2 100–2 400	0,25–0,33	2,5–3,8
Гіпс	2,2–2,4	4 700–5 100	2 200–2 600	0,30–0,40	3,3–5,7
Дерево	0,4–1,1	3 000–5 000	1 000–3 200	0,20–0,40	0,1–3,0
Залізо	7,8	5 850	3 230	0,28	21
Алюміній	2,7	6 260	3 080	0,34	6,8
Граніт	2,7–2,8	5 200–5 500	3 000–3 300	0,20–0,30	5,6–7,5
Мармур	2,6–2,8	5 300–5 500	2 800–3 200	0,24–0,33	5,5–7,5
Вапняк	2,6–2,7	3 100–4 700	2 000–3 100	0,11–0,22	3,5–6,3
Пісковик	2,2–2,7	2 200–4 600	1 800–2 400	0,15–0,30	1,6–5,0

Передній фронт акустичного сигналу завжди поширюється зі швидкістю поздовжніх хвиль, тобто з максимальною швидкістю. Розсіювальні властивості матеріалів залежно від довжини хвилі пояснюються шаруватістю та тріщинуватістю середовища, кристалічною будовою та температурним рухом частинок, мінливістю фізичних властивостей та речовинного складу, наявністю включень та порожнин, структурних блоків та плоскопаралельних структур.

Таким чином, утворюються класичні акустичні хвилеводи – ділянки середовища, обмежені в одному або двох напрямках порожнинами, тріщинами або іншими середовищами, внаслідок чого усувається або зменшується розбіжність хвиль у сторони, тому поширення їх уздовж шарів відбувається з меншим ослабленням, ніж у необмеженому однорідному або неоднорідному середовищі (рис. 3).

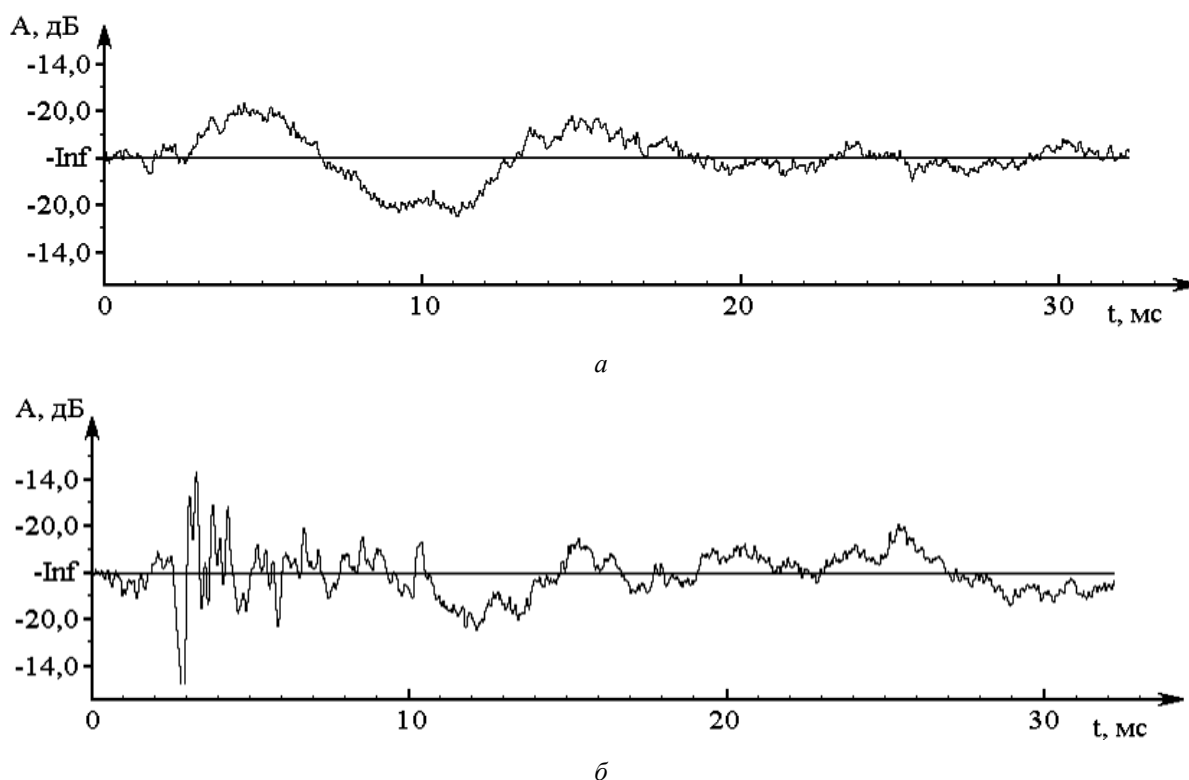


Рис. 3. Відмінність віброакустичних коливань в цілику (а) і в тріщинуватому середовищі (б) на прикладі гіпсової плити

Вид хвиль, що розповсюджуються в таких акустичних хвилеводах без зміни своєї структури, – нормальні хвилі (моди). Закриття тріщин, відшарувань у матеріалі однозначно переводить однорідну нормальну хвилю в неоднорідну, що експоненційно загасає, і навпаки.

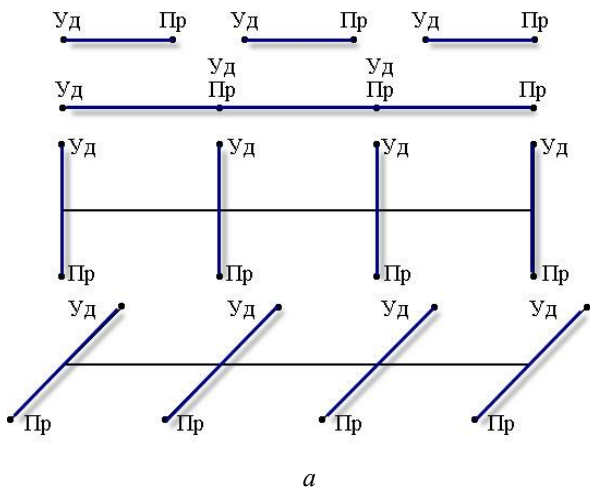
Для встановлення розміру зони тріщинуватості необхідно аналізувати осцилограми, одержані під час прозвучування на різних відстанях по довжині елемента конструкції. База прозвучування повинна залишатися постійною, оскільки зі збільшенням відстані максимум спектральної щільності внаслідок

різного поглинання на високих та низьких частотах зміщується переважно у бік низьких частот.

Для ідентифікації пошкодженості будівель і споруд апробовано методи віброакустичного профілювання та зондування. На рисунку 4 показано методи поздовжнього та взаємоперпендикулярного профілювання на одній або різних рівновеликих базах.

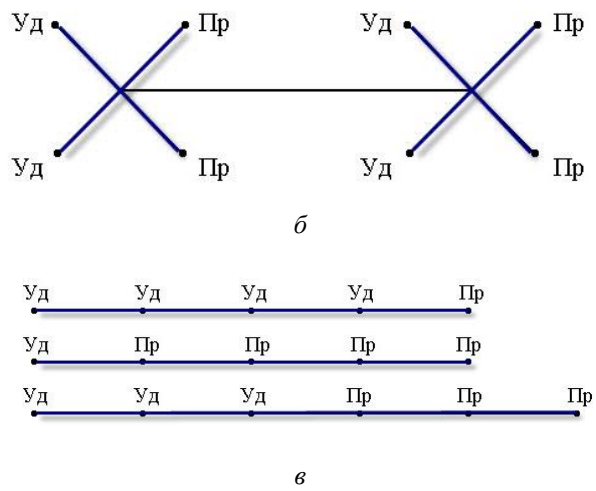
Поздовжнє акустичне профілювання може виконуватися вздовж криволінійного профілю, наприклад, уздовж криволінійної несної конструкції. Детальність контролю (крок, база) визначаються поставленим

завданням, конкретними умовами та його



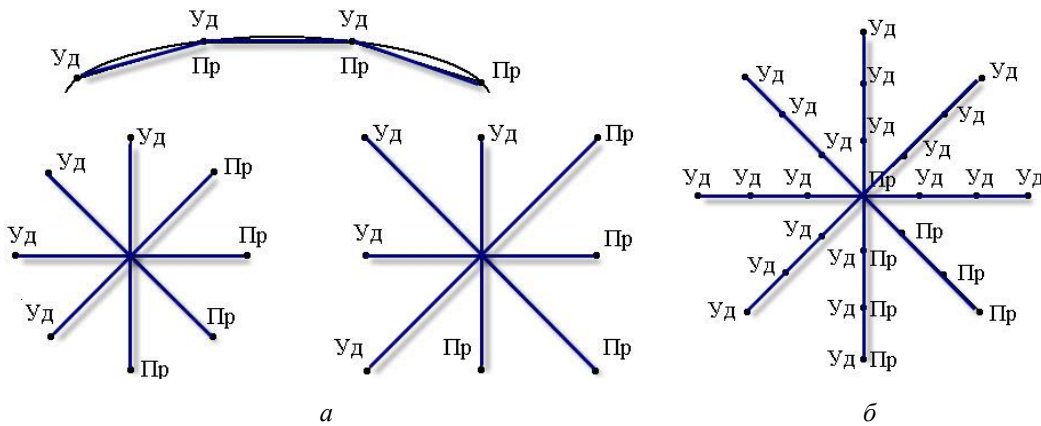
а

мінливістю.

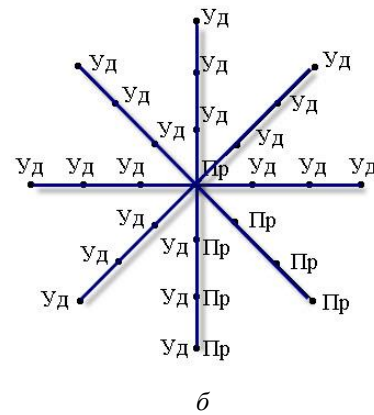


б

Рис. 4. Методи вібраакустичного контролю пошкодження будівель та споруд: векторне (а), квадрупольне (б) та кругове (в) профілювання



а



б

Рис. 5. Методи вібраакустичного зондування конструктивних елементів будівель та споруд: лінійне (а) та кругове (б)

Для оцінення тріщинуватості ефективний метод акустичного каротажу. Визначення просторового розташування тріщин найперспективніше за допомогою відбитих хвиль. Тріщинуваті зони чітко виділяються з порушенням кореляції фазових ліній. Швидкості поздовжніх хвиль в інтервалі тріщинуватості практично не змінюються.

На рисунку 5 показано методи вертикального акустичного зондування з трьома можливими варіантами. Вертикальне акустичне зондування відрізняється методикою його проведення та інтерпретацією результатів вимірів. Наприклад, заміна місць удару та прийому акустичних коливань може повністю змінити результати показань приладу на протилежні. Глибина контролю залежить від

величини бази, оцінення переважно здійснюється у зоні приймача.

Тріщинуваті або зруйновані ділянки будівель і споруд характеризуються безліччю взаємопов'язаних параметрів, що випадково змінюються, тому для їх вивчення необхідний статистико-ймовірнісний підхід. Це дає можливість отримувати інтегральні параметри середовища на основі аналізу системи статистичних оцінок з певною довірчою ймовірністю та точністю. Тому, за винятком великих тріщин, метод ультразвукового прозвучування визначатиме деяку усереднену тріщинуватість з урахуванням пористості та структурних неоднорідностей.

Визначимо основні завдання методики контролю стану будівель та споруд. Основні завдання попередніх спостережень

полягають в оціненні зовнішніх пошкоджень елементів конструкцій, визначенні меж найбільш небезпечних зон, визначенні можливості використання методів неруйнівного контролю, уточненні особливих вимог щодо техніки безпеки.

Для отримання оперативної інформації про стан будівель та споруд необхідно

здійснювати комплекс заходів щодо контролю параметрів, які адекватно визначають стійкість об'єктів. До цих параметрів належать деформації конструкцій, тріщини та відколи в елементах будівель та споруд (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами

Методи контролю	Процеси, що контролюються	Параметр контролю та ідентифікації
Спостереження за станом будівель і споруд	Зовнішні пошкодження	- зміщення і деформації елементів конструкцій у місці пошкодження; - межі найбільш небезпечних зон, що візуально спостерігаються
Спостереження за руйнуваннями	Магістральні тріщини та вивали матеріалів	- розкриття і протяжність тріщин; - об'єми, розташування та ступінь небезпеки вивалів будівельних матеріалів
Нівелювання	Зміщення елементів конструкцій	- взаємні зсуви та зміщення елементів конструкцій
Віброакустичний контроль конструктивних елементів	Приховані пошкодження, межі відшарувань	- розташування та ступінь небезпеки прихованих пошкоджень; - глибина, поздовжній та поперечний розміри відшарувань

За необхідності визначення прихованої порушеності елементів конструкцій або недостатнього об'єму даних виконується віброакустичний контроль.

Ця методика ефективна, оскільки структурні порушення і руйнування, що відбуваються в будівлях і спорудах, можуть бути зафіксовані значно раніше, ніж проявляються візуально.

За допомогою віброакустичного методу реєструються частота, амплітуда та час коливань. Оцінення результатів проводиться у разі найбільшої з амплітуд коливань у частотних смугах, що відображається індикатором спектра.

Приклад віброакустичного профілювання показано на рисунку 6, де визначені ділянки із зонами прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні.

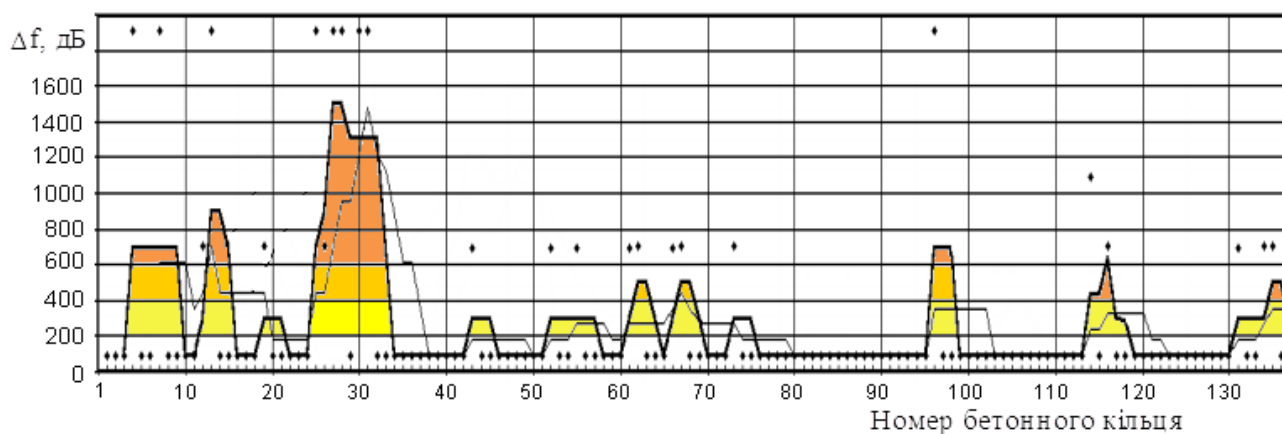


Рис. 6. Приклад зміни частот спектральної щільності акустичних відгуків бетонних конструкцій

Оскільки розбиті тріщинами являють собою плоскопаралельну конструктивні елементи споруд найчастіше структуру, в замкнутій системі (при $\lambda < 2a/n$,

де λ – довжина хвилі, м; n – номер моди; a – ширина хвилеводу, м) виникають резонансні коливання внаслідок багаторазового відбиття звукових хвиль від берегів тріщин. Тому можна визначити глибини меж зон тріщиноутворення за критичними частотами перших резонансних мод однорідних хвиль, які виникають за ударного впливу:

$$a = \frac{v_s \cdot n}{2f_r}, \quad (1)$$

де a – глибина відшарування, м; v_s – швидкість зсувних хвиль, м/с; f_r – резонансна частота, Гц.

Таким чином, під час моніторингу віброакустичним методом устанавлюються межі зон підвищеної тріщинуватості в конструктивних елементах будівель та споруд, які служать, у тому числі, і для уточнення результатів візуальних спостережень та зовнішніх оглядів.

Стан будівель та споруд у процесі експлуатації змінюється. Наслідки часткових руйнувань, як зазначено вище, можуть бути зафіксовані за допомогою візуальних спостережень та віброакустичного моніторингу. До найважливіших показників, за якими можна оцінити безпеку контрольованого об'єкта, належать ризики, що визначаються як ймовірність виникнення аварій та передбачуваних наслідків. Ризики пов'язані з небажаними подіями, зокрема, з втратою стійкості об'єкта контролю або раптових обвалів несних конструкцій за фіксований період часу.

Використання ризиків для оцінення ступеня небезпеки – загальноприйнятий метод, який покладено в основу оцінення поточного та прогнозованих станів небезпеки контрольованої системи. Для наших умов розрахунків цих показників виконується за абсолютними значеннями фіксованих параметрів моніторингу (див. табл. 2) та за швидкістю їх зміни за проміжок часу, що допомагає запобігти несприятливим подіям на основі існуючих даних.

Для визначення комплексних показників оцінки безпеки використано модель інтегрованого ризику. У зв'язку з

тим, що об'єктом досліджень стало часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), для оцінення ризиків втрати стійкості прийнято дві основні групи факторів ризику.

Перша група чинників пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Через те, що критичними можуть бути пошкодження, що визначаються параметрами з обох груп, максимальний ризик ідентифікується шляхом порівняння і вибору максимального значення ризику в групі:

$$R(F)^v = k_1^v R(F_1)^v + k_2^v R(F_2)^v + \dots + k_i^v R(F_i)^v$$

∨

$$R(F)^a = k_1^a R(F_1)^a + k_2^a R(F_2)^a + \dots + k_j^a R(F_j)^a, \quad (2)$$

де $R(F_i)$, $R(F_j)$ – ризики виникнення аварійної ситуації від факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно; i, j – кількість параметрів; k_1^v , k_1^a – нормалізовані коефіцієнти від 0 до 1 (в сумі дорівнюють одиниці) впливу на ризик окремих чинників групи.

Показники ризиків дозволяють дати оперативну оцінку безпеки конструктивних елементів будівель та споруд.

Висновки

Для превентивного оцінення стійкості та можливості подальшої експлуатації будівель і споруд:

1. Втрата стійкості бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементів несних конструкцій може бути м'якою або жорсткою. За м'якої втрати стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які проявляються в поступовому ослабленні несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень.

Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості конструктивних елементів або швидкого зростання тріщин,

які активізуються раптовим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів через розриви іржавої арматури, пожежі, хвилі або афтершоки землетрусів, вибухових хвиль.

2. Моделюванням процесу руйнування методом скінченних елементів встановлено, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель і споруд. Елементи конструкцій пошкоджуються зростанням мережі мікротріщин із формуванням областей непружних деформацій і магістральних тріщин.

3. Визначено основні завдання методики і параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами. Під час моніторингу віброакустичним методом встановлюються межі зон підвищеної тріщинуватості в конструктивних елементах будівель та

споруд, які служать, у тому числі, і для уточнення результатів візуальних спостережень та зовнішніх оглядів.

4. У зв'язку з тим, що об'єктом досліджень стало часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), для оцінення ризиків втрати стійкості запропоновано дві основні групи факторів ризику. Перша група пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Інтегральний ризик втрати стійкості визначається шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групі.

Результати досліджень дозволяють удосконалити метод оцінення зміни структури середовища внаслідок виникнення спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Azimi M., Eslamlou A., Pekcan G. Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: state-of-the-art review. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (10). Pp. 2778.
2. Wegerich S. W. Similarity based modeling of time synchronous averaged vibration signals for machinery health monitoring. In: In IEEE aerospace conference proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720). Big Sky, MT, USA, 3-6 March 2004. Vol. 6. Pp. 3654–3662.
3. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Pp. 012010.
4. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. Pp. 00094.
5. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources: 3rd International Sci. and Tech. Conf.: book of abstracts*. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.
6. Singh A. K., Chen B., Tan V. B. et al. A theoretical and numerical study on the mechanics of vibro-acoustic modulation. *The J Acoust Soc America*. 2017. Vol. 141 (4). Pp. 2821–2831.
7. Karve P., Miele S., Neal K. et al. Vibro-acoustic modulation and data fusion for localizing alkali – silica reaction – induced damage in concrete. *Struct Heal Monit*. 2020. Vol. 19. Pp. 1905–1923.
8. Яланський О. А., Беліков А. С., Барабанов С. С., Слащова О. А., Іконніков М. Ю. Ідентифікація геомеханічних та геотехнічних структур віброакустичним методом для систем автоматизованого контролю стійкості наземних споруд та гірничих виробок. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2023. № 2 (53). С. 101–109.
9. Sheriff R. E., Geldart L. P. *Exploration Seismology: 2nd edition*. Cambridge University Press. Online publication date: June 2012. P. 592.

REFERENCES

1. Azimi M., Eslamlou A. and Pekcan G. Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: state-of-the-art review. *Sensors*. 2020, vol. 20 (10), p. 2778. URL: <https://doi.org/10.3390/s20102778>

2. Wegerich S.W. Similarity based modeling of time synchronous averaged vibration signals for machinery health monitoring. In: In IEEE aerospace conference proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720), Big Sky, MT, USA, 3-6 March 2004, vol. 6, pp. 3654–3662. URL: <https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368182>
3. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 970, p. 012010. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>
4. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, p. 00094. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900094>
5. Slashchova O.A., Yalanskyi O.A. and Slashchov A.I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. Innovative Development of Resource-saving Technologies and Sustainable Use of Natural Ources : 3nd International Sc. and Tech. Conf. Book of Abstracts. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020, pp. 126–127. URL: <https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/1>
6. Singh A.K., Chen B., Tan V.B. et al. A theoretical and numerical study on the mechanics of vibro-acoustic modulation. The J. Acoust Soc America. 2017, vol. 141 (4), pp. 2821–2831. URL: <https://doi.org/10.1121/1.4981133>
7. Karve P., Miele S., Neal K. et al. Vibro-acoustic modulation and data fusion for localizing alkali–silica reaction–induced damage in concrete. Struct Heal Monit. 2020, vol. 19, pp. 1905–1923. URL: <https://doi.org/10.1177/1475921720905509>
8. Yalanskyi O., Byelikov A., Barabanov S., Slashchova O. and Ikonnikov M. *Identyfikatsiya heomekhanichnykh ta heotekhnichnykh struktur vibroakustychnym metodom dlya system avtomatyzovanoho kontrolyu stiykosti nazemnykh sporud ta hirnychykh vyrobok* [Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings]. *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu* [Journal of Donetsk Mining Institute]. 2023, no. 2 (53), pp. 101–109. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109> (in Ukrainian).
9. Sheriff R.E. and Geldart L.P. Exploration Seismology. 2nd edition. Cambridge University Press. Online publication date: June 2012, p. 592. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168359>

Надійшла до редакції: 10.02.2024.

UDC 614.841:536.46

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.126.1051

SIMULATION OF THE COMBUSTION PROCESSES OF PYROTECHNIC POWDER OF METAL FUEL MAGNESIUM

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DIADIUSHENKO O.O.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
DIBROVA O.S.³, *Cand. Sc. (Tech.)*,
HRUSHOVINCHUK O.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KHYZHNIAK A.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*,
NOZHKO I.O.⁶, *Cand. Sc. (Ped.)*

¹ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (067) 611-26-48, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

³ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (097) 355-00-55, e-mail: o.dibrova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4104-9500

⁴ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (067) 366-06-02, e-mail: grushovinchuk@dcs.gov.ua, ORCID ID: 0000-0001-5093-5435

⁵ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (067) 470-44-33, e-mail: khyzhniak_andrii@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0005-1745-0432

⁶ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (093) 992-65-72, e-mail: nozhko_ihor@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-1554-0088

Abstract. Problem statement. The problem of the lack of a database for evaluating the fire-hazardous properties of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences significantly complicates the prediction of the fire-hazardous properties of pyrotechnic mixtures under conditions of various external thermal influences (for example, in the event of ignition of warehouses where pyrotechnic products equipped with charges from the mixtures in question are stored, under conditions of transportation at intense convective heating of their surfaces, or during aerodynamic heating of the metal shells of products during firing and flight), an important characteristic of which is the heat flow that heats the metal cases of pyrotechnic products to critical temperatures that may exceed the flash point of metal fuels in gaseous products of thermal decomposition of oxidants. **Purpose of the article** is to obtain such a database on the ignition temperature of the particles of the considered metals under conditions of elevated heating temperatures and external pressures in the form of simple experimental and statistical models, convenient for practical evaluations. To solve this problem, the methods of experimental and statistical modeling were used and specialized software was developed using regression and interpolation methods, which allows you to calculate the levels of ignition temperatures of metal fuel particles in gaseous products $O_2 + N_2$ (main products decomposition of nitrate-containing oxidizers [1; 12; 15; 18; 19]), which characterize their ability to accelerate the ignition process under conditions of elevated heating temperatures and external pressures. **Conclusion.** New regularities of the complex influence of various controlled parameters on the ignition temperature of magnesium particles in the products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers have been established. The combustion processes of pyrotechnic metal fuel powders were simulated and the influence of controlled parameters on the ignition temperature of magnesium metal fuel particles was determined, which is necessary for the further formation of a database on the fire-hazardous properties of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences.

Keywords: *fire safety; pyrotechnic products based on multi-component nitrate-metallized mixtures; processes of ignition and development of combustion*

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВОГО ПАЛЬНОГО МАГНІЮ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ДЯДЮШЕНКО О. О.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ДІБРОВА О. С.³, *канд. техн. наук*,
ГРУШОВІНЧУК О. В.⁴, *канд. техн. наук*,

ХИЖНЯК А. А.⁵, канд. техн. наук,
НОЖКО І. О.⁶, канд. пед. наук

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (067) 611-26-48, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

³ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (097) 355-00-55, e-mail: o.dibrova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4104-9500

⁴ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (067) 366-06-02, e-mail: grushovinchuk@dcs.gov.ua, ORCID ID: 0000-0001-5093-5435

⁵ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (067) 470-44-33, e-mail: khyzhniak_andrii@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0005-1745-0432

⁶ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (093) 992-65-72, e-mail: nozsko_igor@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-1554-0088

Анотація. Постановка проблеми. Проблема відсутності бази даних для оцінення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів в умовах зовнішніх теплових впливів значно ускладнює прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах різноманітних зовнішніх теплових впливів (наприклад, загоряння складів, де зберігаються піротехнічні вироби, споряджені зарядами з відповідних сумішей, в умовах транспортування при інтенсивному конвективному нагріванні їх поверхонь або при аеродинамічному нагріванні металевих оболонок виробів під час стрільби та польоту), важлива характеристика з яких – тепловий потік, що нагріває металеві корпуси піротехнічних виробів до критичних температур, які можуть перевищувати температуру спалаху металевих палив у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювачів. **Мета статті** – отримати базу даних про температуру займання частинок розглянутих металів в умовах підвищених температур нагріву та зовнішнього тиску у вигляді протист експериментально-статистичних моделей, зручних для практичних оцінок. Застосовано методи експериментально-статистичного моделювання та розроблено спеціалізоване програмне забезпечення із застосуванням методів регресії та інтерполяції, що дозволяє розрахувати рівні температур займання частинок металевих палив в газоподібних продуктах $O_2 + N_2$ (основні продукти розпаду – нітратумісні окиснювачі [1; 12; 15; 18; 19]), що характеризує їх здатність прискорювати процес займання в умовах підвищених температур нагріву та зовнішнього тиску. **Висновок.** Установлено нові закономірності комплексного впливу різних контрольованих параметрів на температуру займання частинок магнію в продуктах термічного розкладання нітратумісних окиснювачів. Проведено моделювання процесів горіння порошків піротехнічного металевих палив та визначено вплив контрольованих параметрів на температуру займання частинок палива металевих магнію, що необхідно для подальшого формування бази даних про пожежонебезпечні властивості піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термічних впливів.

Ключові слова: пожежна безпека; піротехнічні вироби на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей; процеси загоряння та розвитку горіння

Introduction. For the practical use of the obtained results on the ignition of particles of metallic fuel magnesium in various oxidizing media, including gaseous products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers (nitrates of alkali and alkaline earth metals) of pyrotechnic mixtures for various purposes [1; 3–13; 16; 17; 20–23], it is necessary to create a database based on them, convenient for evaluating the fire-hazardous properties of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences, one of the main

parameters of which is the ignition temperature of metal particles. At present, the specified database is missing, which makes it difficult to predict the fire-hazardous properties of pyrotechnic mixtures under conditions of various external thermal influences (for example, during the ignition of warehouses where pyrotechnic products equipped with charges from the mixtures in question are stored, under conditions of transportation with intense convective heating of their surfaces, or during the aerodynamic heating of the metal

casings of the products during the shot and flight), an important characteristic of which is the heat flow that heats the metal cases of pyrotechnic products to critical temperatures that may exceed the flash point of metal fuels in gaseous products of thermal decomposition of oxidants. This leads to premature activation of the products, which leads to their destruction with the formation of high-temperature combustion products that fly at high speeds in different directions and are a fire hazard for surrounding objects [1; 2; 7; 10–12].

Analysis of publications. Currently, research on the influence of technological parameters of mixture charges (ratio of components and their dispersion, compaction coefficient, diameter of the charge and the material of its shell, humidity of the oxidizer, etc.) and external conditions (heating temperature, external pressures, humidity and composition of the environment, etc.) on the main characteristics of their processes ignition and development of combustion (temperature and composition of combustion products, speed of combustion and explosive modes of its development, etc.) are presented in separate articles, monographs and scientific works [14–29]. However, their systematization and analysis from the point of view of practical application at enterprises of Ukraine to increase efficiency in the organization of fire protection systems at objects with the presence of pyrotechnic products, especially in conditions of external thermal influences, are missing.

Purpose of the article is to obtain such a database on the ignition temperature of the particles of the considered metals under conditions of elevated heating temperatures and external pressures in the form of simple experimental and statistical models, convenient for practical evaluations.

Research results. To solve this problem, the methods of experimental and statistical

modeling were used and specialized software was developed using regression and interpolation methods, which allows you to calculate the levels of ignition temperatures of metal fuel particles in gaseous products $O_2 + N_2$ (main products decomposition of nitrate-containing oxidizers [1; 12; 15; 18; 19]), which characterize their ability to accelerate the ignition process under conditions of elevated heating temperatures and external pressures.

Modeling of combustion processes to calculate the dependence of the ignition temperature (T_c , K) on the size of metal particles (d_m , micron), the relative mass concentration of oxygen in the gas mixture $O_2 + N_2$ and external pressure (P , Pa).

The data used were obtained using standard pyrotechnic equipment, as well as well-known photographic methods and methods of microcinema shooting [1; 9; 16; 12].

The model of the combustion process of magnesium powders for the considered metals has the following expression:

$$T_c(d_m, C_{O_2}, P) = C_{O_2} + 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot (118 - 6,3 \cdot P) \cdot d_m^{0,6} + (375,4 - 75,6 \cdot P) \cdot (1 - C_{O_2}^2) \cdot d_m^{-1} - 59,1 \cdot P^{-2 \cdot d_m} + 1062 - 1,2 \cdot P - 0,5 \cdot P^{0,5} \cdot (d_m + C_{O_2})^{-1}$$

Ranges of change of controlled parameters $54 \leq d_m \leq 305$ micron; $0,2 \leq C_{O_2} \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Pa.

The results of calculations based on the presented model made it possible to establish the following ranges of changes in the ignition temperature of metal particles in the products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers, shown in Fig. 1–9.

For magnesium particles, the flash point is $T_c = 780 \dots 1330$ K.

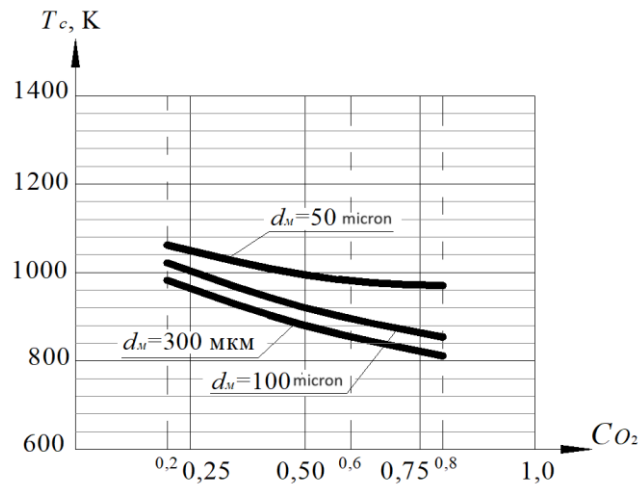


Fig. 1. The influence of the size of magnesium particles and the external pressure $P = 10^5$ Pa on the dependence of the flash point of particles in a gas medium $O_2 + N_2$ on the relative mass concentration of oxygen at different sizes of magnesium particles

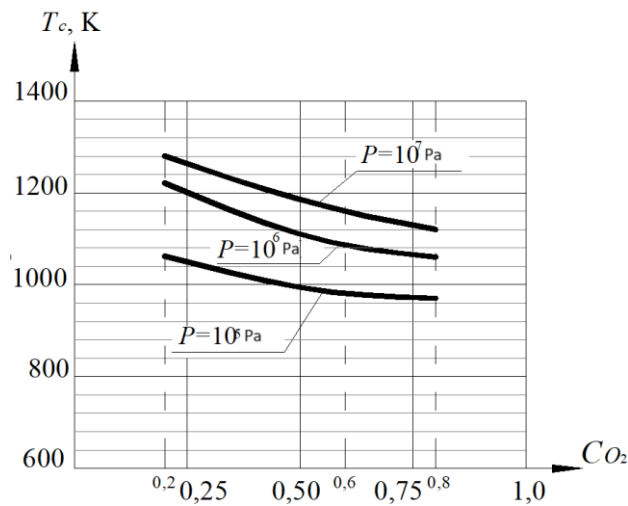


Fig. 2. The influence of the size of magnesium particles $d_m = 50$ мкм and external pressure on the dependence of the flash point of particles in the $O_2 + N_2$ gas environment on the relative mass concentration of oxygen at different external pressures

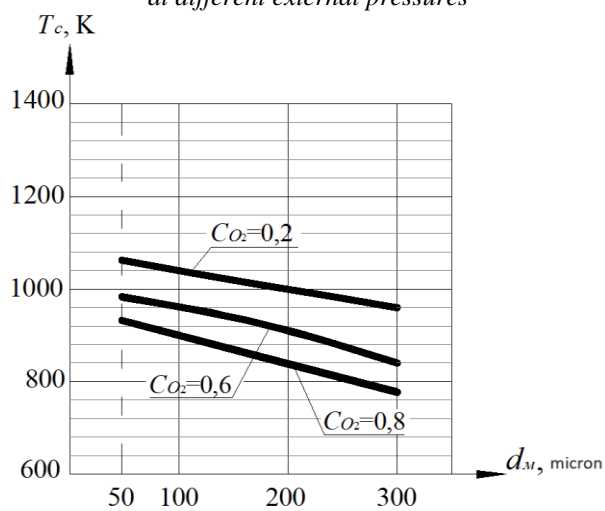


Fig. 3. The influence of the relative mass concentration of oxygen and the external pressure $P = 10^5$ Pa on the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in a gas medium $O_2 + N_2$ on its size at different values of the relative mass concentration of oxygen

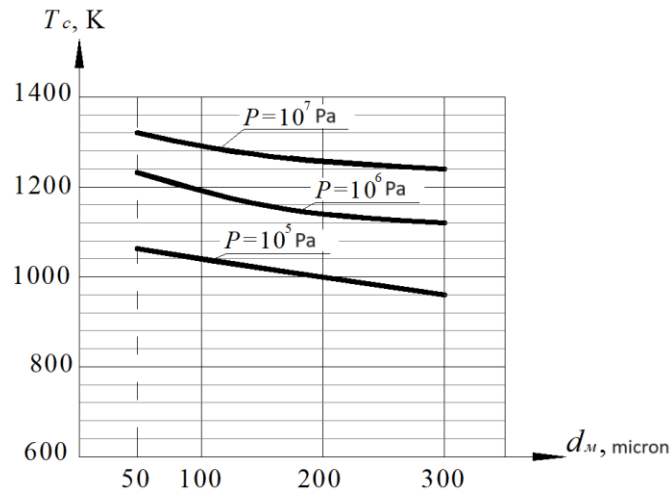


Fig. 4. The influence of the relative mass concentration of oxygen $C_{O_2} = 0,2$ and external pressure on the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in a gas medium $O_2 + N_2$ on its size at different values of the external pressure

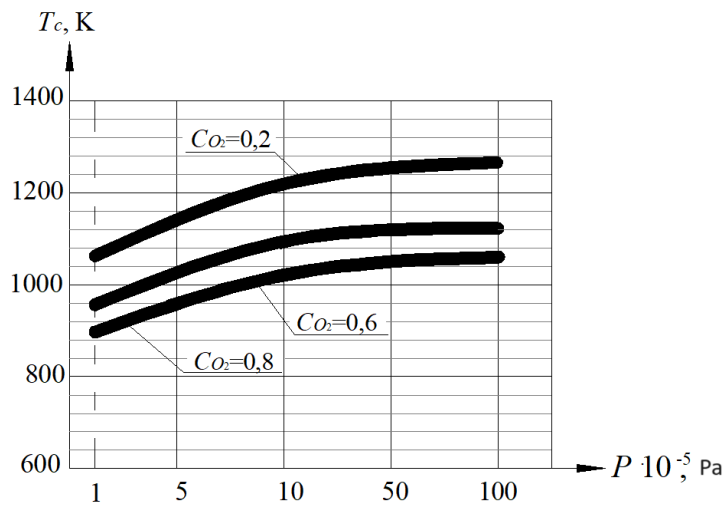


Fig. 5. The effect of the relative mass concentration of oxygen and the size of magnesium particles $d_m = 50$ micron on the dependence of the flash point of the particles on the external pressure at different values of the relative mass concentration of oxygen

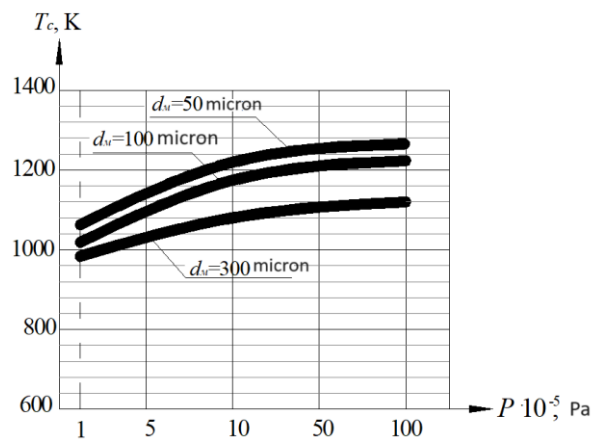


Fig. 6. The influence of the relative mass concentration of oxygen $C_{O_2} = 0,2$ and the size of magnesium particles on the dependence of the flash point of particles on the external pressure at different values of the size of magnesium particles

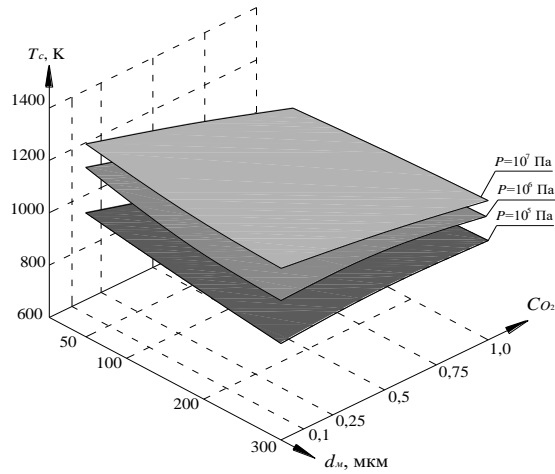


Fig. 7. Three-dimensional image of the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in an $O_2 + N_2$ gas environment C_{O_2} on the parameters and d_m .

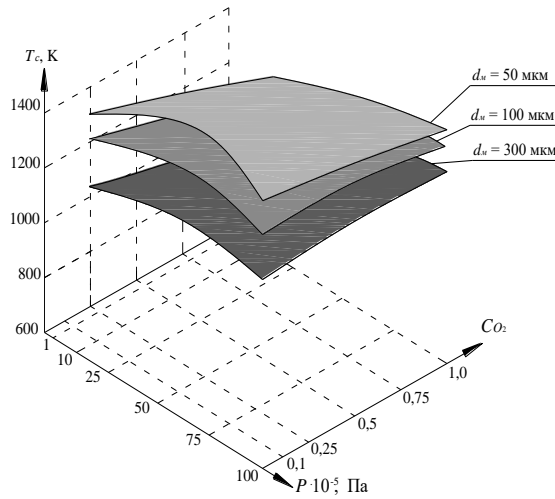


Fig. 8. Three-dimensional image of the dependences of the ignition temperature of a magnesium particle in an $O_2 + N_2$ gas environment on the parameters C_{O_2} and P

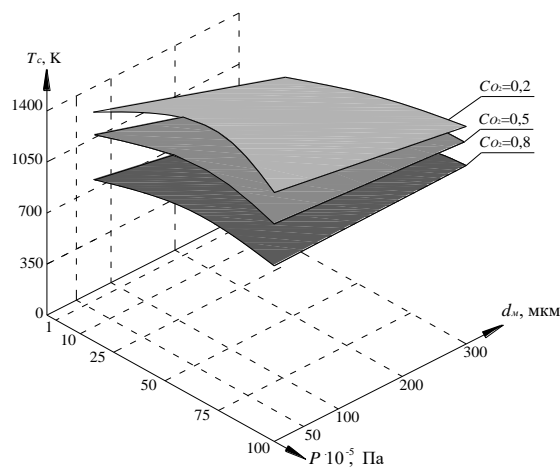


Fig. 9. Three-dimensional image of the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in an $O_2 + N_2$ gas environment on the parameters P and d_m

At the same time, as a result of the calculations for the ranges of changes of the considered parameters (d_m , C_{O_2} , P) used in practice, the processes of ignition and development of combustion of magnesium particles proceed stably and do not have an explosive nature.

In addition, a change in the specified controlled parameters significantly affects the behavior of the ignition temperature of metal particles: an increase d_m in and C_{O_2} leads to a decrease in T_c , and an increase in P – to an increase in T_c .

The obtained model makes it possible to use the software to form a controlled database on the ignition temperatures of magnesium particles in the gaseous decomposition products of nitrate-containing oxidants under external heating conditions.

Conclusion

The regularity of the complex effect on the ignition temperature of magnesium particles of the following parameters was established: an increase in the particle size from $d_m = 5$ micron to $d_m = 300$ micron and a decrease in the relative oxygen content from $C_{O_2} = 0.8$ to $C_{O_2} = 0.2$ leads to a decrease T_c , an increase in external pressure from $P = 10^5$ Pa to $P = 10^7$ Pa leads to an increase. The developed model of the combustion process is used to form a database of calculation data on the effect of the main controlled parameters of pyrotechnic powders (d_m , C_{O_2} , P) on the ignition temperature of magnesium particles in the composition of pyrotechnic mixtures

REFERENCES

1. Vashchenko V.A., Kirichenko O.V., Lega Yu.G., Zaika P.I., Yatsenko I.V. and Tsybulin V.V. *Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh sistem* [Combustion processes of metallized condensed systems]. *Naukova dumka* [Science Thought]. 2008, 745 p. (in Russian).
2. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Tyshchenko E.O. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishey pry yikh ekspluatatsiyi* [Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2018, no. 2, pp. 5–11. (in Ukrainian).
3. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Baranovskyi O.S. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya vmistu vysokotemperaturnoho kondensatu v produktakh z-horyannya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey pry pidvyshchennykh zovnishnikh tyskakh* [Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures]. *Nauka ta vyrobnytstvo : mizhvuz. temat. zb. nauk. pr.* [Science and Production : interuniversity thematic collection of scientific works]. 2018, iss. 19, pp. 323–332 (in Ukrainian).
4. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A. and Kolinko S.O. *Doslidzhennya spalakhuvannya ta horinnya chastynok alyuminiyovo-mahniyevykh splaviv u produktakh rozkladannya tverdykh pirotekhnichnykh palyv* [Research on the ignition and burning of particles of aluminum-magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels]. *Naukovy visnyk : Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka* [Scientific Bulletin : Civil Protection and Fire Safety]. 2019, no. 2 (8), pp. 81–85. (in Ukrainian).
5. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O. and Tsybulin V.V. *Doslidzhennya vplyvu mitsnosti zaryadiv pirotekhnichnykh nitratnoymetalevykh sumishey na pozhezhnu bezpeku vyrobiv na yikh osnovi* [Study of the impact of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products on their basis]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2019, no. 3, pp. 56–67. (in Ukrainian).
6. Kyrychenko O.V., Motrichuk R.B., Dibrova O.S., Melnyk V.P., Vashchenko V.A. and Butenko T.I. *Doslidzhennya spalakhuvannya ta horinnya chastynok metalevoho pal'noho u produktakh rozkladannya nitratovmisnykh okysnyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pry zovnishnikh termichnykh vplyvakh* [Study of ignition and burning of metal fuel particles in decomposition products of nitrate-containing oxidants and organic substances under external thermal influences]. *Problemy pozharney bezopasnosti : zbirnyk nauchnykh trudov* [Problems of Fire Safety : collection of scientific works]. 2020, no. 47, pp. 50–59. (in Ukrainian).
7. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Butenko T.I. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy* [Determination of critical modes of development of pyrotechnic combustion processes of nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects]. *Visnyk Cherkas'koho*

derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2020, no. 2, pp. 123–133. (in Ukrainian).

8. Dibrova O., Kyrychenko O., Motrychuk R., Tomenko M. and Melnyk V. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *Technology Audit and Production Reserves* (ISSN 2664-9969). 2020, no. 1/1 (51), pp. 44–49.

9. Dibrova O.S., Kyrychenko O.V., Motrichuk R.B. and Vashchenko V.A. *Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy* [Patterns of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures under conditions of external thermal effects]. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2020, no. 5/5798. URL: <http://www.inter-nauka.com> (in Ukrainian).

10. Motrichuk R.B., Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Butenko T.I., Kyrychenko Ye.P. and Tsybulin V.V. *Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv ta zovnishnikh chynnykiv na temperaturu ta sklad produktiv z-horyannya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey* [Patterns of influence of technological parameters and external factors on the temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2020, no. 4, pp. 131–142. (in Ukrainian).

11. Zhartovskiy S., Titenko O., Kyrychenko O., Tyshchenko I., Motrichuk R. and Melnyk V. Procedure for constructing a mathematical model to determine the time of the initial stage of fire evolution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021, no. 1/10 (109), pp. 45–52.

12. Kyrychenko O.V. *Povysheniye effektivnosti pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchikh izdeliy v usloviyakh ikh primeneniya* [Increasing the efficiency of pyrotechnic nitrate-containing products under the conditions of their use]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2009, no. 2, pp. 89–94. (in Ukrainian).

13. Vashchenko V.A. *Fiziko-khimicheskiye svoystva alyuminiya, magniya, titana i tsirkoniya : trudy NII prikladnoy khimii* [Physico-chemical properties of aluminum, magnesium, titanium and zirconium : Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1973, no. 8990, 36 p. (in Russian).

14. Vashchenko V.A. *Kineticheskiye kharakteristiki protsessov okisleniya, vosplamneniya i goreniya chastits alyuminiya, magniya, titana i tsirkoniya* [Kinetic characteristics of the processes of oxidation, ignition and combustion of particles of aluminum, magnesium, titanium and zirconium]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1973, no. 8991, 35 p. (in Russian).

15. Vashchenko V.A. *Vosplamneniye chastits metallov v produktakh razlozheniya pirosovostavov* [Ignition of metal particles in the decomposition products of pyrochemical compositions]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1974, no. 9130, 70 p. (in Russian).

16. Vashchenko V.A. *Vosplamneniye i goreniye odinichnykh chastits metallov v produktakh razlozheniya mnogokomponentnykh metallizirovannykh sistem* [Ignition and combustion of single metal particles in decomposition products of multicomponent metallized systems]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1975, no. 10267, 54 p. (in Russian).

17. Vashchenko V.A. *Fiziko-khimicheskiye osnovy protsessa goreniya smesey nitrata natriya s magniyem, alyuminiyem, titanom i tsirkoniyem* [Physico-chemical foundations of the combustion process of mixtures of sodium nitrate with magnesium, aluminum, titanium and zirconium]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1973, no. 8734, 34 p. (in Russian).

18. Vashchenko V.A. *Vosplamneniye i goreniye sovokupnosti chastits metallov v produktakh razlozheniya mnogokomponentnykh metallizirovannykh sistem* [Ignition and combustion of a set of metal particles in the decomposition products of multicomponent metallized systems]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1975, no. 10763, 47 p. (in Russian).

19. Silin N.A., Vashchenko V.A., Kashporov L.Ya. et al. *Metallicheskiye goryuchiye geterogennykh kondensirovannykh sistem* [Metallic combustibles of heterogeneous condensed systems]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical Engineering]. 1976, 320 p. (in Russian).

20. Vashchenko V.A. *Protsessy vosplamneniya pirotekhnicheskikh sostavov* [Processes of ignition of pyrotechnic compositions]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1977, no. 11210, 12 p. (in Russian).

21. Vashchenko V.A. *Zakonomernosti goreniya mnogokomponentnykh metallizirovannykh sistem* [Combustion patterns of multicomponent metallized systems]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1979, no. 11667, 16 p. (in Russian).

22. Silin N.A., Vashchenko V.A. and Kashporov L.Ya. *Goreniye metallizirovannykh geterogennykh kondensirovannykh sistem*. [Combustion of metallized heterogeneous condensed systems]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical Engineering]. 1982, 232 p. (in Russian).

23. Vashchenko V.A. *Vysokotemperaturnyye tekhnologicheskkiye protsessy vzaimodeystviya kontsentririrovannykh istochnikov energii s materialami* [High-temperature technological processes of interaction of concentrated energy sources with materials]. Monograph, 1996, 408 p. (in Russian).

24. Pokhil V.P., Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Logachev V.S. and Korotkov A.I. *Goreniye poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh* [Combustion of powdered metals in active media]. *Nauka* [Science]. 1972, 294 p. (in Russian).

25. Silin N.A., Vashchenko V.A., Zaripov N.I. et al. *Okisliteli geterogennykh kondensirovannykh sistem* [Oxidizers of heterogeneous condensed systems]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical Engineering]. 1978, 456 p. (in Russian).

26. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Akinshin V.D. and Tsybulin V.V. *Spalakhuvannya chastynok alyuminiyu v produktakh rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry pidvyshchennykh temperaturakh nahrivu* [Ignition of aluminum particles in decomposition products of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures at elevated heating temperatures]. *Pozhezhna bezpeka : teoriya i praktyka : zbirnyk naukovykh prats'* [Fire Safety : Theory and Practice : collection of scientific works]. Cherkasy APB named after Heroes of Chernobyl, 2011, no. 9. (in Ukrainian).

27. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tyshchenko S.O. *Vysokotemperaturne oksylennya mahniyu v produktakh rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry zovnishnikh termovplyvakh* [High-temperature oxidation of magnesium in decomposition products of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures under external thermal influences]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2011, no. 3, pp. 115–120. (in Ukrainian).

28. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A. and Tsybulin V.V. *Termichne rozkladannya dobavok orhanichnykh rehovyn v pirotekhnichnykh sumishakh v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Thermal decomposition of additives of organic substances in pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal influences]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2011, no. 4, pp. 116–120. (in Ukrainian).

29. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V., and Tupytskyi V.M. *Termichne rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv pirotekhnichnykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers of pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal influences]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2011, no. 2 (24), pp. 71–79. (in Ukrainian).

30. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Vysokotemperaturne oksylennya alyuminiyu v produktakh rozkladannya oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey v umovakh zovnishn'oho nahrivu*. [High-temperature oxidation of aluminum in decomposition products of oxidants and organic substances of pyrotechnic mixtures under external heating conditions]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2011, no. 1 (24), pp. 47–53. (in Ukrainian).

31. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Spalakhuvannya chastynok tsyrkoniyu v produktakh termichnoho rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry pidvyshchennykh temperaturakh nahrivu* [Ignition of zirconium particles in products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures at elevated heating temperatures]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2012, no. 1, pp. 31–38. (in Ukrainian).

32. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Vysokotemperaturne oksylennya metalichnykh pal'nykh v produktakh rozkladannya oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey v umovakh zovnishn'oho nahrivu* [High-temperature oxidation of metallic fuels in decomposition products of oxidants and organic substances of pyrotechnic mixtures under external heating conditions]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2011, no. 3 (24). (in Ukrainian).

33. Kyrychenko O.V. *Vysokotemperaturne oksylennya tsyrkoniyu v produktakh rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry zovnishn'omu nahrivi* [High-temperature oxidation of zirconium in decomposition products of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures under external heating]. *Pozhezhna bezpeka : teoriya i praktyka : zbirnyk naukovykh prats'* [Fire Safety: Theory and Practice : collection of scientific works]. Cherkasy : APB named after Heroes of Chernobyl, 2012, no. 10. (in Ukrainian).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Лега Ю. Г., Заика П. И., Яценко И. В., Цыбулин В. В. Процессы горения металлизированных конденсированных систем. *Наукова думка*. 2008. 745 с.

2. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Тищенко С. О., Цибулін В. В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2018. № 2. С. 5–11.

3. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Барановський О. С., Цибулін В. В. Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках. *Наука та виробництво : міжвуз. темат. зб. наук. пр.* 2018. Вип. 19. С. 323–332.

4. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 2 (8). С. 81–85.

5. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2019. № 3. С. 56–67.

6. Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Діброва О. С., Мельник В. П., Ващенко В. А., Бутенко Т. І. Дослідження спалахування та горіння частинок металевого пального в продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах. *Сборник научных трудов : Проблемы пожарной безопасности*. 2020. № 47. С. 50–59.

7. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 2. С. 123–133.

8. Dibrova O., Kyrychenko O., Motrychuk R., Tomenko M., Melnyk V. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *Technology audit and production reserves (ISSN 2664-9969)*. 2020. № 1/1(51). Pp. 44–49.

9. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2020. № 5/5798. URL: <https://www.inter-nauka.com>

10. Мотрічук Р. Б., Кириченко О. В., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Кириченко С. П., Цибулін В. В. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 4. С. 131–142.

11. Zhartovskiy S., Titenko O., Kyrychenko O., Tyshchenko I., Motrichuk R., Melnyk V. Procedure for constructing a mathematical model to determine the time of the initial stage of fire evolution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 1/10 (109). С. 45–52.

12. Кириченко О. В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2009. № 2. С. 89–94.

13. Ващенко В. А. Физико-химические свойства алюминия, магния, титана и циркония. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1973. № 8990. 36 с.

14. Ващенко В. А. Кинетические характеристики процессов окисления, воспламенения и горения частиц алюминия, магния, титана и циркония. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1973. № 8991. 35 с.

15. Ващенко В. А. Воспламенение частиц металлов в продуктах разложения пиросоставов. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1974. № 9130. 70 с.

16. Ващенко В. А. Воспламенение и горение одиночных частиц металлов в продуктах разложения многокомпонентных металлизированных систем. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1975. № 10267. 54 с.

17. Ващенко В. А. Физико-химические основы процесса горения смесей нитрата натрия с магнием, алюминием, титаном и цирконием. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1973. № 8734. 34 с.

18. Ващенко В. А. Воспламенение и горение совокупности частиц металлов в продуктах разложения многокомпонентных металлизированных систем. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1975. № 10763. 47 с.

19. Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. и др. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем. *Машиностроение*. 1976. 320 с.

20. Ващенко В. А. Процессы воспламенения пиротехнических составов. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1977. № 11210. 12 с.

21. Ващенко В. А. Закономерности горения многокомпонентных металлизированных систем. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1979. № 11667. 16 с.

22. Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем. *Машиностроение*. 1982. 232 с.

23. Ващенко В. А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами : монография. 1996. 408 с.

24. Похил В. П., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. *Наука*. 1972. 294 с.

25. Силин Н. А., Ващенко В. А., Зарипов Н. И. и др. Окислители гетерогенных конденсированных систем. *Машиностроение*. 1978. 456 с.

26. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Акіньшин В. Д., Цибулін В. В. Спалахування частинок алюмінію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву. *Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. пр.* Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. № 9.

27. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тищенко С. О. Високотемпературне окислення магнію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішніх термовпливах. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2011. № 3. С. 115–120.

28. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Термічне розкладання добавок органічних речовин в піротехнічних сумішах в умовах зовнішніх термовпливів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2011. № 4. С. 116–120.

29. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Термічне розкладання нітратовмісних окислювачів піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2011. № 2 (24). С. 71–79.

30. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Високотемпературне окислення алюмінію в продуктах розкладання окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей в умовах зовнішнього нагріву. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2011. № 1 (24). С. 47–53.

31. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Спалахування частинок цирконію в продуктах термічного розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 1. С. 31–38.

32. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Високотемпературне окислення металічних пальних в продуктах розкладання окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей в умовах зовнішнього нагріву. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2011. № 3 (24).

33. Кириченко О. В. Високотемпературне окислення цирконію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішньому нагріві. *Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. пр. Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля*, 2012. № 10.

Надійшла до редакції: 15.02.2024.

UDC 519.6:626.86

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.137.1052

MODELING GROUND WATERS DYNAMICS AND POLLUTION

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOZACHYNA V.V.^{2*}, *Postgrad. Stud.*

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

^{2*} Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (056) 373-15-09, e-mail: kozachyna.valeriia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7433-7306

Abstract. Problem statement. Large accumulators of liquid waste (e.g., mine water ponds, tailing ponds, etc.) are long-term sources that change the hydrological regime. A negative consequence of this process is flooding of the territory. In addition, the infiltration of contaminated water from such hazardous sources changes the quality of groundwater. Therefore, it is important to analyze the impact of such anthropogenic sources on the process of flooding and deterioration of groundwater quality. To solve this problem, it is very important to use the method of mathematical modeling as an effective mean of researching problems of this class, since the use of physical modeling is practically impossible within the scope of problems of this class. **The purpose of the article.** Development of numerical models for predicting changes in the hydrological regime (flooding of the territory) and groundwater quality under the influence of anthropogenic pollution sources. **Methodology.** To assess the dynamics of changes in the hydrological regime, a two-dimensional equation of filtration of a non-pressure groundwater flow is used. A two-dimensional geomigration equation (planned model) is used to analyze changes in groundwater quality during infiltration of contaminated water from the settling pond. This equation takes into account the convective transfer of contaminants in the filtration flow, dispersion, and the intensity of contaminant infiltration into the groundwater flow. The method of total approximation is used for numerical integration of the filtration equation. For the numerical integration of the geomigration equation, an implicit splitting scheme is used. **Scientific novelty.** Effective numerical models for rapid assessment of changes in groundwater dynamics and quality under the influence of anthropogenic sources that change the hydrological regime are proposed. The constructed numerical models take into account a set of important physical factors that affect the process of geomigration and flooding of the territory, namely: filtration coefficient, variable depth of free-flowing groundwater, dispersion, intensity of the source of impurity emission into the groundwater flow. This makes it possible to obtain a comprehensive assessment of the process of flooding and groundwater pollution. **Practical significance.** A computer code has been created that allows practical usage of the developed numerical models. This code is an effective tool for theoretical study of non-stationary processes of territory flooding and anthropogenic groundwater pollution. **Conclusions.** A numerical model for calculating groundwater dynamics has been developed. The model allows to predict the level of groundwater rise under the influence of a man-made source of wastewater infiltration from a settling pond. A numerical model for calculating the process of geomigration from an anthropogenic source of emissions has been developed. The model makes it possible to predict the dynamics of contamination zone formation in a non-pressure groundwater flow. The developed numerical models take into account the most important parameters that affect the formation of flooding zones and groundwater contamination.

Keywords: *ground waters dynamics; ground waters pollution; territory flooding; mass transfer; mathematical modeling*

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ГРУНТОВИХ ВОД ТА ЇХ ЗАБРУДНЕННЯ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КОЗАЧИНА В. В.^{2*}, *асп.*

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 гідраліки, 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

Анотація. Постановка проблеми. Великі накопичувачі рідких відходів (наприклад, шахтні водойми, хвостосховища тощо) – це довготривалі джерела, що змінюють гідрологічний режим. Негативним наслідком

цього процесу стає підтоплення території. Крім того, проникнення забрудненої води з таких небезпечних джерел змінює якість ґрунтових вод. Тому актуальним бачиться аналіз впливу таких антропогенних джерел на процес підтоплення та погіршення якості підземних вод. Для розв'язання цієї задачі дуже важливе застосування методу математичного моделювання як ефективного засобу дослідження задач цього класу, оскільки застосування фізичного моделювання в рамках задач цього класу практично неможливе. **Мета роботи** – розроблення чисельних моделей для прогнозування зміни гідрологічного режиму (підтоплення території) та якості підземних вод за впливу джерел антропогенного забруднення. **Методика.** Для оцінення динаміки змін гідрологічного режиму використовується двовимірне рівняння фільтрації безнапірного стоку підземних вод. Двовимірне рівняння геоміграції (планова модель) використовується для аналізу змін якості ґрунтових вод під час інфільтрації забрудненої води з відстійника. Це рівняння враховує конвективний перенос забруднень у фільтраційному потоці, дисперсію та інтенсивність інфільтрації забруднювачів у потік ґрунтових вод. Для числового інтегрування рівняння фільтрації застосовується метод повної апроксимації. Для чисельного інтегрування рівняння геоміграції використовується неявна схема розщеплення. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективні числові моделі для експрес-оцінки змін динаміки та якості підземних вод за впливу антропогенних джерел, що змінюють гідрологічний режим. Побудовані чисельні моделі враховують комплекс важливих фізичних факторів, що впливають на процес геоміграції та затоплення території, а саме: коефіцієнт фільтрації, змінну глибину залягання безнапірних підземних вод, дисперсність, інтенсивність джерела викиду домішок у підземні води, потік. Це дає можливість отримати комплексну оцінку процесу підтоплення та забруднення підземних вод. **Практична значимість.** Створено комп'ютерний код, який дозволяє практично використовувати розроблені числові моделі. Цей код – ефективний інструмент для теоретичного дослідження нестационарних процесів підтоплення території та антропогенного забруднення підземних вод. **Висновки.** Розроблено чисельну модель для розрахунку динаміки підземних вод. Модель дозволяє прогнозувати рівень підняття ґрунтових вод за впливу техногенного джерела інфільтрації стічних вод із відстійника. Розроблено числову модель для розрахунку процесу геоміграції від антропогенного джерела викидів. Модель дає змогу прогнозувати динаміку формування зони забруднення в безнапірному стоці ґрунтових вод. Розроблені числові моделі враховують найважливіші параметри, що впливають на формування зон затоплення та забруднення ґрунтових вод.

Ключові слова: динаміка підземних вод; забруднення підземних вод; затоплення території; масоперенос; математичне моделювання

Problem statement. Problem of ground waters rise, pollution and its management attracts attention among the world [1; 3; 8; 9].

Many engineering projects, especially large-scale ones, involve excavation work on aquifers. For all such excavations, an appropriate groundwater and surface water management and control system(s) must be planned before the start of each project. In practice, this can only be done with information about the soil conditions and groundwater that may be encountered based on site investigation data. Groundwater control (as well as surface water runoff) is generally considered by the client, engineer, and architect to be a “temporary work”, the contractor's responsibility, and is almost always of little or no interest to them. In many cases, this philosophy proves to be short-sighted and ultimately results in significant financial, time and reputational losses for the client.

Sometimes, as the work progresses, the actual soil and groundwater conditions may differ from those expected. If this occurs, all

stakeholders should be prepared to consider changing operations and construction methods as the work progresses and more information becomes available. This will provide the best assurance that the project will be completed safely, economically, and within the realistic timeframe and cost of the program.

It is particularly important to note that the rise in groundwater levels is occurring in areas where there is a change in the hydrogeological regime, for example, due to the construction of wastewater storage ponds from various enterprises (Fig. 1).



Fig. 1. Settling pond

https://www.pseau.org/outils/ouvrages/irc_university_of_leeds_waste_stabilization_ponds_2004.pdf

Infiltration of wastewater from ponds leads not only to a rise in the water table (the process of flooding the territory begins), but also to a deterioration in groundwater quality. The situation can be aggravated by the fact that, in addition to deteriorating groundwater quality, wastewater entering the underground stream from storage facilities can be aggressive and, over time, affect the stability of the foundations of structures, underground utilities, etc. In this regard, an important task arises of predicting changes in groundwater dynamics and quality under the influence of man-made, long-term sources of pollution.

It should be emphasized that currently, empirical and analytical models are used to solve problems of this class, which make it possible to determine the dynamics of groundwater and the impact of drainage systems on its change [2; 3–6; 9; 10]. Such models are effective in engineering practice, but they provide predictive data only for “simplified” scenarios. Due to the increasing level of requirements for predictive results, there is an increasing need to use numerical models to solve problems of this class. Therefore, the development of numerical multifactor models that allow solving applied problems at a new level remains an urgent problem.

The purpose of the article. Development of a numerical model for analyzing changes in groundwater dynamics and quality under the influence of anthropogenic sources of pollution.

Methodology. The process of groundwater rise under the influence of a settling pond with contaminated wastewater is considered. The groundwater dynamics is described by the following equation (generalized Boussinesq equation):

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right) + W, \quad (1)$$

where h – depth of underground flow; k – filtration coefficient; μ – lack of saturation; W – infiltration rate; h_m – average depth of underground flow.

When using equation (1), an aquitard is assumed to be horizontal.

The components of the underground flow velocity vector are determined on the basis of Darcy's law:

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, v = -k \frac{\partial h}{\partial y}. \quad (2)$$

The setting of boundary conditions for equation (1) is discussed in [3].

Since the wastewater in settling ponds is contaminated, the infiltration of this wastewater into groundwater leads to its gradual contamination. Therefore, when analyzing the environmental impact of settling ponds, it is necessary to analyze the process of mass transfer of contaminants in groundwater. Over time, these impurities will reach water intakes from groundwater sources, which will have a negative impact on public health.

The geomigration equation averaged over the depth of the groundwater flow is used to predict groundwater contamination [3–5]:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \\ + \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \end{aligned} \quad (3)$$

where u, v – components of the underground flow rate; S – concentration of impurities in the underground flow; Q – intensity of impurity emission into the underground stream; μ_x, μ_y – dispersion coefficients; n is porosity coefficient; t – time.

The position of the emission source (sedimentation pond) is modeled using the Dirac delta function $\delta(x-x_i)(y-y_i)$, where x_i, y_i – Cartesian coordinates of the emission source.

The formulation of boundary conditions for equation (3) is discussed in [4; 5].

Numerical model. For the numerical integration of modeling equations (1), (3), a rectangular difference grid is used. The value of the depth of the underground flow and the concentration of the impurity is determined in the middle of the rectangular difference cells. The components of the filtration flow rate are determined on the sides of the difference cells. Markers are used to build the view of the

computational domain, specify the position of the pollution source, the location of the river, etc.

To build a numerical model of the filtration flow, equation (1) is reduced to the form:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = W. \quad (5)$$

For numerical solution of equation (4), a difference scheme of total approximation was used:

- first step of splitting:

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

- 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 $a = \frac{kh_m}{\mu}$.

For numerical integration Eq. (5) Euler method was used.

For numerical solution of the geomigration equation (3), it was split as follows [1]:

$$n \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (6)$$

$$n \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (7)$$

$$n \frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i)(y - y_i). \quad (8)$$

A two-step splitting scheme was used for numerical solution of equation (6) [1]:

- first step of splitting:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2};$$

- second step of splitting:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

where $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$, $u^- = \frac{u - |u|}{2}$. Here and further

the following designation was used: $Vt = \frac{Vt}{n}$.

The following two-step splitting scheme was used for numerical solution of equation (7) [1]:

- first step of splitting:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2},$$

- second step of splitting:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

where $v^+ = \frac{v + |v|}{2}$, $v^- = \frac{v - |v|}{2}$.

For numerical integration of equation (8), the Euler method is used.

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 – initial data file (entering information about the size of the calculation area, the location of the pollution source, the concentration of the impurity in the wastewater in the lagoon, etc.);

2. Wa1 is a subroutine for calculating the dynamics of groundwater depth change over time;

3. Wa2 is a subroutine for calculating the components of the filtration flow rate;

4. Wa3 – a subroutine for calculating the change in the concentration of an impurity in groundwater over time.

The proposed numerical model can be used for solving the following problems:

1. Modeling ground waters dynamics due to different factors.

2. Modeling dynamics of ground waters pollution near storages with wastes.

3. Modeling ground waters pollution after accident spillages.

4. Modeling ground waters dynamics due to drainage systems.

Results. Below there are the results of model problem solving. The following problem was considered: there is a contamination zone in ground waters which was formed after the accident spilling (Fig. 2). The underground water layer had the following parameters: 15 m was the depth of underground flow at the upper boundary of the calculation region (boundary $x = 0$) and at the low boundary the depth of underground flow was 11 m; $k = 4$ m/day; $\mu = 0.2$; $W = 0.001$ m/s; $\mu_x = 0.1u$; $\mu_y = 0.1v$; $S = 100$ (dimensionless concentration).

Dynamics of pollutant zone moving is shown in Figures 2–4. Time is dimensionless. Every number in these Figures show the dimensionless concentration as the percentage from the maximum concentration C_{max} at this time step.

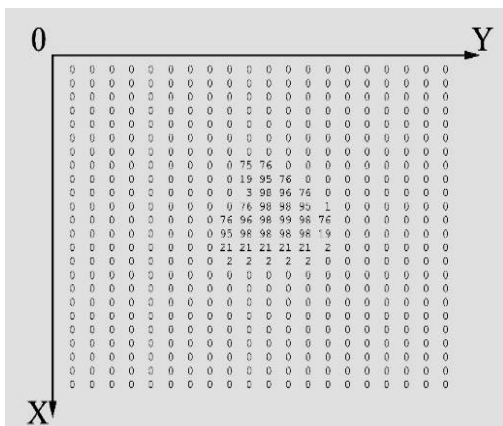


Fig. 2. Contamination area $C_{max} = 98$, $t = 0.15$

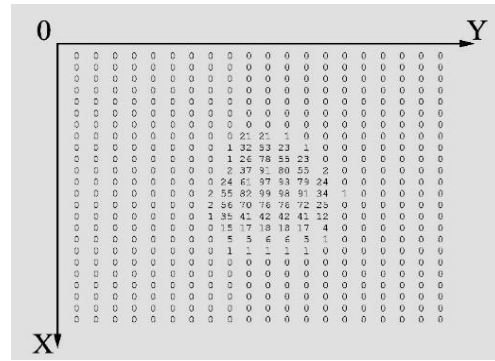


Fig. 3. Contamination area $C_{max} = 84$, $t = 0.22$

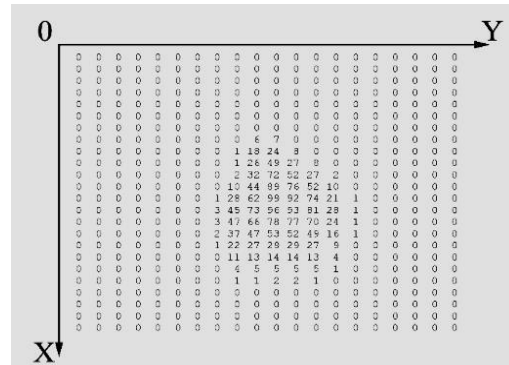


Fig. 4. Contamination area $C_{max} = 72$, $t = 0.22$

As can be seen from Figures 2–4 the contaminated zone slowly enlarges. It moves to the low boundary of the calculation region. Diffusion and convection cause decrease of impurity concentration in ground waters. It should be noted that the calculation time for each variant of the problem was 3 seconds. Thus, the built numerical models allow us to quickly analyze changes in the hydrogeological regime and groundwater pollution. This is very useful when performing serial calculations in practice.

Scientific novelty and practical value.

Effective numerical models for quick assessment of changes in groundwater dynamics and quality under the influence of anthropogenic sources that change the hydrological regime are proposed. The constructed numerical models take into account a set of important physical factors that affect the process of geomigration and flooding of the territory, namely: filtration coefficient, variable depth of free-flowing groundwater, dispersion, intensity of the source of impurity emission into the groundwater flow. This makes it possible to obtain a comprehensive assessment of the process of groundwater flooding and

contamination. A computer code has been created that allows for the practical use of the developed models.

Conclusions. 1. A numerical model for calculating groundwater dynamics was developed. The model makes it possible to predict the level of groundwater rise under the influence of a man-made source of wastewater infiltration from a pond - a sedimentation tank.

2. A numerical model for calculating the process of geomigration from an anthropogenic source of emissions was developed. The model makes it possible to predict the dynamics of the

formation of a contamination zone in a non-pressure groundwater flow.

3. The constructed numerical models take into account the most important parameters affecting the formation of flooding zones and groundwater contamination.

4. The results of the computational experiment show that the constructed mathematical models make it possible to quickly obtain predictive data for analyzing the impact of anthropogenic sources on changes in groundwater quality and their regime.

REFERENCES

1. Hurytskyi D.S. *Analiz rehionalnoho rozvytku protsesiv pidtoplennia zemel ta yikh vplyv na pryrodni resursy Ukrainy* [Analysis of regional development of land flooding processes and their impact on natural resources of Ukraine]. *Heoinformatyka* [Geoinformatics]. 2013, no. 1, pp. 85–89. (in Ukrainian).

2. DSTU-N B V.1.1-38:2016. *Nastanova shchodo inzhenernoho zakhystu terytoriy, budivel' i sporud vid pidtoplennya ta zatoplennya* [DSTU-N B V.1.1-38:2016. Guidelines engineering protection of the territory, building and structure from water logging and flooding]. Kyiv : SE “State Research Institute of Building Constructions”, 2017, 135 p. (in Ukrainian).

3. Kovalchuk P.I. and Shevchuk S.A. *Metodyka otsinky ta pryiniattia rishen dlia zakhystu terytorii vid pidtoplennia ta zatoplennia* [Methodology for assessment and decision-making to protect territories from flooding and inundation]. Kyiv, 2010, 43 p. (in Ukrainian).

4. Kremez V.S., Buts Yu.V. and Tsymbal V.A. *Modeliuvannia protsesu pidtoplennia terytorii v zoni vplyvu vodoskhovyshch* [Modeling the process of flooding of territories in the area of influence of reservoirs]. *Liudyna ta dokillia. Problemy neoeologii* [Man and Environment. Issue of Neoeology]. 2012, no. 1–2, pp. 128–130. (in Ukrainian).

5. Mytrokhin S.O. *Modeli ta metody optimalnoho keruvannia zapobihannia protsesu pidtoplennia terytorii* [Models and methods for optimal management of flood prevention]. PhD dissertation on specialty 01.05.04 – system analysis and theory of optimal solutions. Kyiv : Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2011. (in Ukrainian).

6. Rudakov D.V. *Matematychni metody v okhoroni pidzemnykh vod* [Mathematical methods in groundwater protection]. Dnipro : National Mining University, 2012, 158 p. (in Ukrainian).

7. Shcherbak O.V., Yakovliev Ye.O. and Dolin V.V. *Modeliuvannia hidroheofiltratsiinohopolia gruntovykh vod u zoni vplyvu metalurhiinoho vyrobnytstva* [Modeling of the hydrogeofiltration field of groundwater in the zone of influence of metallurgical production]. *Mineralni resursy Ukrainy* [Mineral Resources of Ukraine]. 2018, no. 3, pp. 19–25. (in Ukrainian).

8. Cashman P.M. and Preene M. *Groundwater lowering in construction: a practical guide to dewatering*. Hoboken, NJ : CRC Press, 2012, 665 p.

9. Guangwei Wu, Yulong D., Lei L., Yingqiang Y., Yubai B., Jian G., and Sha G. *Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW*. *Hydraulic and Civil Engineering Technology*. 2023, no. VIII, pp. 766–774.

10. Harbaugh A.W. *MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process : report*. Book 6: Modeling techniques, Section A. Ground-water. 2005. URL: <https://doi.org/10.3133/tm6A16>

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гурицький Д. С. Аналіз регіонального розвитку процесів підтоплення земель та їх вплив на природні ресурси України. *Геоінформатика*. 2013. № 1. С. 85–89.

2. ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2017. 135 с.

3. Ковальчук П. І., Шевчук С. А. *Методика оцінки та прийняття рішень для захисту територій від підтоплення та затоплення*. Київ, 2010. 43 с.

4. Кремец 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.

5. Митрохін С. О. Моделі та методи оптимального керування запобігання процесу підтоплення територій. Дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук за спеціальністю 01.05.04 – системний аналіз і теорія оптимальних рішень. Київ : Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2011.
6. Рудаков Д. В. Математичні методи в охороні підземних вод : навч. посіб. Дніпро : Національний гірничий університет, 2012. 158 с.
7. Щербак О. В., Яковлев Є. О., Долін В. В. Моделювання гідрогеофільтраційного поля ґрунтових вод у зоні впливу металургійного виробництва. *Мінеральні ресурси України*. 2018. № 3. С. 19–25.
8. Cashman P. M., Preene M. Groundwater lowering in construction: a practical guide to dewatering. Hoboken, NJ : CRC Press, 2012. 665 p.
9. Guangwei Wu, Yulong D., Lei L., Yingqiang Y., Yubai B., Jian G., Sha G. Study on Groundwater Environmental Impact Assessment in Datang Binzhou Combined Heat and Power Generation Project Based on MODFLOW. *Hydraulic and Civil Engineering Technology*. 2023. № VIII. Pp. 766–774.
10. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model-the ground-water flow process : report. Book 6 : Modeling techniques, Section A. Ground-water. URL: <https://doi.org/10.3133/tm6A16>

Надійшла до редакції: 01.03.2024.

УДК 691.5:624.016

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.144.1053

METHODS OF INFLUENCE ON THE SYSTEM TO CHANGE THE ENERGY STATE OF SUBSTANCE : EXPERIENCE, STATE OF THE ISSUE

HUSEINOV O.A.^{1*}, *Postgrad. Stud.*,
ZAPOROZHETS V.I.², *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (063) 528-07-05, e-mail: or.huseinov@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-3708-8195

² Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (067) 528-99-05, e-mail: viktor20zh@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-3072-3136

Abstract. Methods of influencing the system, the ultimate goal of which is to destruct the natural structure of the material, can be divided as mechanical, physical, chemical, biological and complex. The changing the energy state of a substance is called activation. The current scientific field of ultradispersed materials and physical and chemical processes caused by dispersion is created by the researches of many scientists. Detailed consideration for the increasing reactivity of a solid substance compared to the change in its specific surface area during its mechanical activation showed that the share attributable to the growth of the specific surface area is only a few percent of the mechanical activation effect. The other part is due to the accumulation of defects in the crystals during the grinding process. According to the law of conservation of energy, when a crystal splits, the potential energy of interaction between lattice nodes is transferred to uncompensated surface energy. In addition, the value of the specific surface energy depends on the type of flat lattice used to split the crystal. Therefore, the activation processes and the application of the substance in the active state are relevant in the development of modern binders and concretes. *The purpose of the article* is to analyse the advantages and disadvantages of the existing methods of influencing the system with the ultimate goal of destruction of the natural structure of the material to changing the energy state of the substance, i.e. its activation. **Conclusions.** During the destruction of solids, the formation of new cleavage surfaces is accompanied by the breaking of bonds between the substance structural elements and the transition of the potential bond energy into surface energy. Ceteris paribus, the higher the ionic charges and the smaller the distance between them (between adjacent flat grids in the lattice), the greater the value of σ . In addition, the value of the specific surface energy depends on the type of flat grids used to split the crystal. It is worth mentioning that not all methods of activation for binder and concrete (soluble) mixtures are currently implemented on an industry level. This is due to various reasons. The main method of activation used on an industry level is mechanochemical activation in various types of mills.

Keywords: *influence on the system; destruction of the structure; specific surface area; methods of activation*

СПОСОБИ ВПЛИВУ НА СИСТЕМУ ДЛЯ ЗМІНИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ РЕЧОВИНИ : ДОСВІД, СТАН ПИТАННЯ

ГУСЕЙНОВ О. А.^{1*}, *асп.*,
ЗАПОРОЖЕЦЬ В. І.², *асп.*

^{1*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (063) 528-07-05, e-mail: or.huseinov@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-3708-8195

² Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (067) 528-99-05, e-mail: viktor20zh@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-3072-3136

Анотація. Способи впливу на систему, кінцева мета яких – руйнування природної структури матеріалу, можна поділити на механічні, фізичні, хімічні, біологічні і комплексні. Зміну енергетичного стану речовини прийнято називати активацією. Сучасний науковий напрям у галузі отримання ультрадисперсних матеріалів та фізико-хімічних процесів, зумовлених диспергуванням, створено працями багатьох учених. Детальний облік підвищення реакційної здатності твердої речовини порівняно зі зміною величини його питомої поверхні в ході його механічної активації показав, що частка, яка припадає на збільшення питомої поверхні, становить лише кілька відсотків від ефекту механоактивації. Решта пов'язана з накопиченням дефектів у кристалах у процесі

подрібнення. Відповідно закону збереження енергії, при розколі кристала потенційна енергія взаємодії вузлів ґрат переходить у поверхневу не скомпенсовану енергію. Крім того, величина питомої поверхневої енергії залежить від типу плоских сіток, якими розколюється кристал. Тому процеси активації та застосування речовини в активному стані бачиться актуальними для створення сучасних в'язучих та бетонів. **Мета статті** – аналіз переваг і недоліків існуючих способів впливу на систему з кінцевою метою руйнування природної структури матеріалу для зміни енергетичного стану речовини, тобто її активації. **Висновки.** При руйнуванні твердих речовин утворення нових поверхонь розколу супроводжується розривом зв'язків між структурними елементами речовини та переходом потенційної енергії зв'язку в поверхневу енергію. За інших рівних умов величини σ тим більші, що вищі заряди іонів і менша відстань між ними (між сусідніми плоскими сітками у ґратах). Крім того, величина питомої поверхневої енергії залежить від типу плоских сіток, якими розколюється кристал. Слід зазначити, що не всі методи активації в'язучих та бетонних (розчинних) сумішей на даний час впроваджені у промислових масштабах. Це відбувається з різних причин. Основний метод активації, що застосовується у промислових масштабах, – механохімічна активація у млинах різного типу.

Ключові слова: вплив на систему; руйнування структури; питома поверхня; способи активації

Problem statement. Methods of influencing the system, the ultimate goal of which is to destruct the natural structure of the material, can be divided as mechanical, physical, chemical, biological and complex. The changing the energy state of a substance is called activation.

The current scientific field of ultradispersed materials and physical and chemical processes caused by dispersion is created by the researches of many scientists.

Detailed consideration for the increasing reactivity of a solid substance compared to the change in its specific surface area during its mechanical activation showed that the share attributable to the growth of the specific surface area is only a few percent of the mechanical activation effect. The other part is due to the accumulation of defects in the crystals during the grinding process.

According to the law of conservation of energy, when a crystal splits, the potential energy of interaction between lattice nodes is transferred to uncompensated surface energy. In addition, the value of the specific surface energy depends on the type of flat lattice used to split the crystal. Therefore, the activation processes and the application of the substance in the active state are relevant in the development of modern binders and concretes.

The purpose of the article is to analyse the advantages and disadvantages of the existing methods of influencing the system with the ultimate goal of destruction of the natural structure of the material to changing the energy state of the substance, i.e. its activation.

Analysis of publications. The current scientific field of ultradispersed materials and physical and chemical processes caused by dispersion is created by the researches of many scientists [1–10].

The process of grinding solids in practice is very complicated due to the set of phenomena that accompany it, such as:

- mechanical (movement of the grinding device body, the grinder itself, friction in bearings, friction of the material to be crushed against the grinding device body, etc);

- physical (deformation of the crystal lattice of the material to be grinded without its significant destruction, heat generation and heating of the particles of the material to be grinded, emission of electrons, etc);

- physical and chemical (breaking of bonds between the lattice nodes, i. e. its destruction, adsorption of gas molecules and surfactants from the environment by the surfaces of the newly formed grains, aggregation of grains with each other, etc);

- chemical phenomena (possible interaction of new surfaces with environmental molecules up to the formation of surface compounds, i. e. mechanochemical phenomena).

During the destruction of solids, the formation of new cleavage surfaces is accompanied by the breakdown of bonds between the structural elements of the substance and the transition of the potential binding energy into surface energy [11]. The presence of surface energy in a solid is caused by the uncompensated force field of ions or the unpaired electron spins on the outer orbitals of

the atoms of the surface nodes of the substance (Fig. 1) [11].

The specific surface energy σ of a solid is considered as the total energy reserve of uncompensated bonds of surface nodes E per unit area of the grain surface:

$$\sigma = E/S. \quad (1)$$

Theoretically, the value of σ can be estimated by knowing the structure of the crystal lattice of a solid.

During the destruction of solids, which is accompanied by the appearance of a new surface, the energy consumption for cleavage is equal to the amount of surface energy $E_r = \sigma \Delta S$. Here, σ is assumed to be a constant average value, although it is known that the specific surface energy is anisotropic.

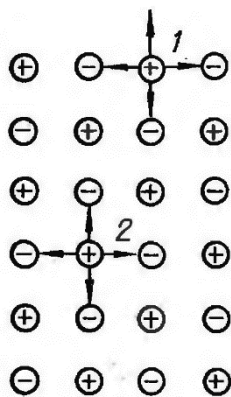


Fig. 1. Position of structural nodes on the surface (1) and inside (2) [11]

During the crystal cleaves, two cleavage surfaces are formed, and the new surface for one lattice node is $S = 2a^2$. Then $E_p = \sigma \cdot 2a^2$ (E_p is the surface energy). According to the law of conservation of energy, during the crystal cleaves, the potential energy of interaction between lattice nodes is transferred to surface uncompensated energy ($E_p = -E_{ne}$) [11].

Ceteris paribus, the higher the ionic charges and the smaller the distance between them (between adjacent flat grids in the lattice), the greater the value of σ . In addition, the value of the specific surface energy depends on the type of flat lattice used to cleave the crystal.

Under external loads approaching the limits of compressive, tensile, and bending strengths, the material to be crushed begins to cleave and cracks appear. The instantaneous cleavage of

the crushed material into smaller pieces is unlikely, as it requires a large supply of energy from the outside to the material.

According to the Griffiths-Orovan-Rebinder theory, the destruction of a solid begins at the points of crystal lattice disruption (near defects). The local stress concentration near these defects under mechanical impact from the outside leads to the formation of nucleated microcracks, which, as they grow further, overlap each other and cause the crushed material to gradually fall to smaller pieces. Thus, a stepwise destruction of a solid is more likely to occur. The growth of microcracks during stepwise material destruction is no longer unambiguous. As long as the grain is subjected to stress, microcracks grow. After the load is temporarily removed (until the next impact by the grinding media), the microcracks can partially close (“heal”) due to the restoration of chemical bonds between the lattice nodes that have moved away from each other by a distance slightly exceeding the interplane distance a . Such self-healing of microcracks leads to the fact that during repeated impacts of the grinding bodies, the grain of the material to be ground has to again expend additional energy to cleave the healed microcrack areas [11].

The presence of a large number of broken (uncompensated) bonds at the surface lattice nodes in a finely dispersed system leads to involuntary aggregation of powder grains. The system tends to reduce its surface energy reserve due to the partial closure of broken bonds at the grain contact points. Additional portions of energy are spent on the destruction of aggregates throughout the grinding process.

The release of a large quantity of heat during milling (primarily due to E_{upr} and E_{tr}) leads to the fact that in the heated material there is an increase in the thermal mobility of the structural elements of the lattice (especially the surface nodes in the grain friction zone). Thus, during dry milling in closed mills, the temperature of the ground material reaches 200 °C and above. This can cause a change in the orientation of the structural elements of the crystal in the near-surface layer – amorphization. With fine and ultrafine milling,

the thickness of the amorphized near-surface layer of grains can be, according to G.S. Khodakov, 15–16 nm [11].

The process of dispersing materials is greatly influenced by the background of the material to be ground and the grinding environment.

For example, it has been found in practice that pre-fired materials are crushed much more efficiently than materials that have not been heat treated. This might be due to:

- polymorphic transformations accompanied by a significant change in volume, which causes cracking;

- rapid, sharp cooling of materials after firing to normal temperature, which leads to the emergence of many macro- and microcracks in them.

In the current conditions of Ukraine, it is not always economically reasonable to carry out preliminary heat treatment of raw materials, but there are raw materials of technogenic origin in the country that have undergone certain heat treatment at the stage of obtaining the main product and, accordingly, can be used effectively in the future.

Grinding (milling) of the material can be carried out in different environments, mainly in air – this is dry milling and in liquid – wet milling.

During dry milling, the high activity of the newly created surfaces (uncompensated broken bonds) causes them to affect gas molecules in the environment, which contributes to the adsorption of these molecules on the surface of the material being ground. The most easily adsorbed water molecules are H₂O, as they have a large dipole moment. Adsorption of H₂O leads to surface interaction of water molecules with solid particles (electrostatic, orientational dispersion interaction, through hydrogen bonds), which causes partial compensation of broken bonds and a decrease in the level of surface energy [11].

Therefore, dry milling results in strong heating of the material to be ground (up to 200 °C and above), desorption of H₂O molecules from the grain surface, and amorphisation of the layers of near-surface grains (at a depth of 15–16 nm).

During wet milling, the picture is different. In the process of stepwise destruction of solids (development of microcracks), H₂O molecules, penetrating into microcracks, prevent the reverse closure (cohesion) of the bonds between the lattice nodes when the load is temporarily removed, thereby reducing the probability of self-healing of cracks and energy consumption for this unproductive activity (Fig. 2).

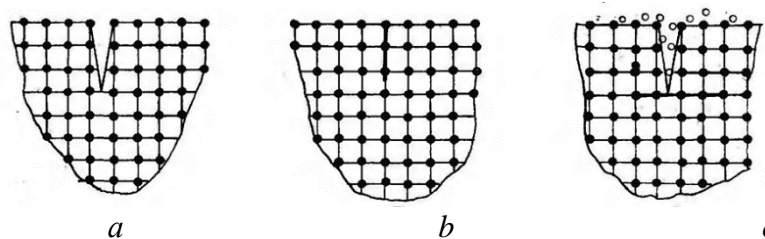


Fig. 2. Scheme of penetration of H₂O molecules into a microcrack [11]: a – microcrack; b – microcrack healing in the absence of liquid; c – penetration of H₂O molecules into the microcrack

Water forms fairly dense polymolecular shells up to 1–10 nm thick on the surface of the material to be ground. These shells have elastic properties that vary with their thickness. The water molecules in such shells are oriented to the grain surface. Such water has a high density (from 1.2 to 2.4 g/cm²), a low heat capacity and freezes at -78 °C. As the water moves away from the grain surface, it gradually becomes

ordinary free water, which determines the fluidity of the suspension [11].

The interaction of water with the surface nodes of the grains (adhesion) causes a decrease in the surface energy level from σ_0 (in a vacuum) to $\sigma_{t.zh.}$ (in liquid) [11].

The presence of water shells around the grains sharply reduces the friction between the grains (water acts as a lubricant), grain aggregation, and thus its heating during milling.

The amorphisation of the surface areas of the grains also decreases (according to G.S. Khodakov, the thickness of the amorphised layer in this case is 1.6–2.0 nm). This means that during wet milling, the deformation of the lattice and its cleavage

account for a larger proportion of the energy supplied to the solid than during dry milling, which makes it possible to increase the efficiency of the grinding process several times and reduce the specific energy consumption for milling.

Table 1

Methods of activation for binder and concrete (soluble) mixtures

№ п/п	Method	Technological characteristics	Advantages	Disadvantages
1	Chemical additives	Modification of compositions	A wide range of modifiable compositions	High cost
2	Introduction of surfactants [16; 17]	Formation of additional crystallisation centres and stimulation of secondary formation growth	Densification of the cement stone structure	Limited range of application
3	Grinding of binder in a mill [18–21]	Different types of mills – ball, vibration, vario-planetary, etc.	Simplicity	High energy consumption
4	Liquid-phase mechano-activation	Mechanical influence produced in the rotary-pulsation apparatus	The hydration process is more complete, and rheological characteristics are improved	Minimum volume of mixture loading per cycle
5	Magnetic activation of kneading water	Magnetic treatment of water	Energy efficiency	Expensive equipment
6	Hydrodynamic activation [22; 23]	Synergistic effect of physical and chemical processes occurring in the flow of moving water, such as aeration, cavitation (cold boiling), collapse and coagulation	Converting water-dissolved substances into insoluble ones with their subsequent removal	Relatively low efficiency
7	Treatment with high-voltage electric discharges [24; 25]	Applying a constant field of high voltage to water-cement systems leads to the phenomena of water electrolysis and electrophoresis	Significant change in the ionic composition of the suspension and the appearance of polarized groups in water	Technological complexity
8	Electro-physical activation	Electromagnetic action (sometimes followed by steaming)	Significant improvement in the elastic strength of concrete	High costs
9	Microwave (dielectric) heating	Absorption of energy of electromagnetic fields of the microwave (HF or UHF) range by the material and conversion of this energy into thermal	High speed of the technological process	Expensive equipment
10	Thermal activation	Heating followed by cooling according to various schemes	Relatively simple and effective method	High costs
11	Ultrasonic treatment [15; 26; 27]	The effect of cavitation, solid-phase grinding, formation of microdefects in crystals is caused	Intensification of cement hydration processes	High energy consumption
12	Thermo-acoustic activation	The dough is pretreated in an aero-hydrodynamic activator, then mixed with aggregates and heated to a temperature of 60-65°C before placing	Strength increases by 1.5 times	Processing complexity

The grinding of materials is even more efficient in the presence of surfactants, which are organic substances that can selectively adsorb to the surface of solid grains, displacing

the previously bound water adhesive film. Such surfactants are fatty acids with rather large hydrocarbon radicals, fatty acid salts (soaps), sulfonic acids and their salts, alcohols, amines,

etc. During the adsorption of these molecules, the surface energy of the solid particles decreases more than during the adsorption of water molecules.

It is considered that surfactants used as additives in small quantities can serve as regulators of the properties of concentrated mineral dispersions.

The use of surfactants can reduce the milling duration. Surfactants, displacing bound water from the surface of solid particles and converting it into free water, increase the fluidity of the suspension and allow reducing the moisture content of the latter by 3–5 % while maintaining the required fluidity of the system [11].

K.K. Strelou and P.S. Mamykin call such substances hardening reducers (substances that facilitate deformation and mechanical destruction of solids) [12]. During the milling of materials in the presence of hardness reducers, two processes occur simultaneously: first, hardness reducers, adsorbing on solid particles, cause a decrease in the elasticity, yield strength and strength limits and thus facilitate milling; second, the liquid, penetrating into the microcracks of the pre-crushing zone, unwinds the pressure on the crack walls (capillary phenomena of the 2nd type). Hardness reducing agents – surfactants – can be aqueous solutions of many mineral salts: sodium chloride, calcium, magnesium and aluminium chloride salts, silicates or organic surfactants in the form of true or colloidal solutions, for example, soap in alkaline solution, etc [12].

One of the most effective methods of regulating the structural and mechanical properties of mineral dispersions is their chemical activation, which consists in introducing acids, alkalis, surfactants, or water-soluble polymers into the dispersed system [13–15].

The methods of activation for binder and concrete mixtures are structured in Table 1.

It should be mentioned that not all of these methods are currently implemented on an industrial level. This is due to various reasons. In particular, methods such as microwave heating, ultrasonic treatment and thermoacoustic activation are not yet sufficiently investigated and, consequently, industrial activators are not yet available. Methods such as electrophysical activation and heat treatment are quite energy-consuming, so manufacturers are in no hurry to implement them. It can be concluded that the main activation method used on an industrial level is mechanochemical activation in various types of mills.

Conclusions

Methods of influencing the system, the ultimate goal of which is to destruct the natural structure of the material, can be divided as mechanical, physical, chemical, biological and complex. The changing the energy state of a substance is called activation.

During the destruction of solids, the formation of new cleavage surfaces is accompanied by the breakdown of bonds between the structural elements of the substance and the transition of the potential binding energy into surface energy

The specific surface energy σ of a solid is considered as the total energy reserve of uncompensated bonds of surface nodes E per unit area of the grain surface:

Ceteris paribus, the higher the ionic charges and the smaller the distance between them (between adjacent flat grids in the lattice), the greater the value of σ . In addition, the value of the specific surface energy depends on the type of flat grids used to split the crystal.

It should be mentioned that not all methods of activation for binder and concrete (soluble) mixtures are currently implemented on an industrial level. This is due to various reasons. The main activation method used on an industrial level is mechanochemical activation in various types of mills.

REFERENCES

1. Krivenko P.V., Petropavlovskii O.N., Vozniuk G.V. and Pushkar V.I. Constructive properties of the concretes made with alkali-activated cements of new generation. First Intern. Conf. on Advances of Chemically-activated Materials (CAM' 2010 – China). 2010, Jinan, Shandong, China. pp. 139–146.

2. Omelchuk V., Guang Y., Runova R. and Rudenko I. Shrinkage behavior of alkali-activated slag cement pastes. *Key Engineering Materials*. Vol. 761, Switzerland, 2018, pp. 45–48.
3. Krivenko P., Runova R., Rudenko I. and Konstantynovskiy O. Potential of alkali activated portland cement-based dry mixes for anchoring application. *NTCC2014 : International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete*. Brno University of Technology, 2014, pp. 123–126.
4. Croymans T., Schroeys W., Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A., Hult M., Marissens G., Lutter G. and Schreurs S. Radiological characterization and evaluation of high volume bauxite residue alkali activated concretes. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017, no. 168, pp. 21–29.
5. Krivenko P. Why alkaline activation – 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2017, no. 8 (3), pp. 323–333.
6. Barabash I. and Harashchenko D. Mechanoactivation of portland cement in the technology of manufacturing the self-compacting concrete. *Vostochno-Evropskii zhurnal peredovikh tekhnologii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2018, no. 3 (6), pp. 12–17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_3%286%29_3
7. Runova R.F., Hots V.I., Nazarenko I.I., Sivko V.Y., Shyliuk P.S., Starchuk V.N., Bratchun V.I., Pluhiv A.M. and Sanytskyi M.A. *Konstruktivni materialy novoho pokolinnia ta tekhnologii yikh vprovadzhennia u budivnytstvo* [Construction materials of the new generation and technologies of their implementation in construction]. Kyiv : UVPK “EksOb”, 2008, 360 p. (in Ukrainian).
8. Hedvall J.A. and Wikdahl L. *Zeitschrift für Elektrochemie und Physikalische Chemie*. 1940, no. 46, pp. 455–458.
9. Shabanova H.M., Popsui K.V., Markov D.Yu. and oth. *Bezklinskiy viazhuchi materialy luzhnoi aktyvizatsii* [Clinker-free binding materials of alkaline activation]. *Vestnyk NTU KhPI : Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia* [Bulletin of NTU KhPI : Chemistry, Chemical Technology and Ecology]. 2010, no. 52. (in Ukrainian).
10. Mechanical powder production process boosts surface engineering application. *Metallurgia*. 1994, vol. 61, no. 9, pp. 273–274.
11. Krupa A.A. and Horodov V.S. *Khymycheskaia tekhnolohiia keramicheskikh materyalov : ucheb. posobyie* [Chemical technology of ceramic materials : textbook]. Kyiv : Vysshiaia Shkola publ., 1990, 399 p. (in Russian).
12. Strelou K.K. and Mamykin P.S. *Tekhnolohiia ohneuporov* [Refractory technology]. Moscow : Metallurhiia Publ., 1978, 376 p. (in Russian).
13. Babkov V.V., Polak A.F. and Komokhov P.H. *Aspekti dolhovechnosti tsementnogo kamnia* [Aspects of durability of cement stone]. *Tsement* [Cement]. 1988, no. 3, pp. 14–16. (in Russian).
14. Teilor Kh. *Khymia tsementa* [Chemistry of cement]. Myr Publ., 1996, 560 p. (in Russian).
15. Neville A.M. and Brooks J.J. *Concrete Technology*; 2th ed. Harlow: Pearson, 2010, 442 p.
16. Rebinder P.A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika* [Physico-chemical mechanics]. Moscow, 1958, 75 p. (in Russian).
17. Komokhov P.H. *Mekhaniko-enerheticheskiye aspekty protsessov hydratatsyy, tverdeniia y dolhovechnosti tsementnogo kamnia* [Mechanical and energy aspects of the processes of hydration, hardening and durability of cement stone]. *Tsement* [Cement]. 1987, no. 2, pp. 20–22. (in Russian).
18. Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. US Department of Transportation, 2003, 176 p.
19. Teichmann T. and Schmidt M. Mix Design and Durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Proceedings of the 4th International Ph. D. Symposium in Civil Engineering*. Munich, 2002, pp. 341–347.
20. Rohani A.B., Rosiyah Y. and Gan S.N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. *Procedia Chemistry*. 2016, no. 19, pp. 189–195.
21. Hussein M.H., Jokhio G.A., Yahaya F.M., Humada A.M. and Gul Y. The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. *Construction and Building Materials*. 2018, no. 175, pp. 26–40.
22. Li N., Farzadni N. and Shi C. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*. 2017, vol. 100, pp. 214–226.
23. Li N., Shi C., Wang Q., Zhang Z. and Ou Z. Composition design and performance of alkali-activated cements. *Materials and Structures. Materiaux et Constructions*. 2017, vol. 50, iss. 3, no. 178.
24. Ndiaye K., Cyr M. and Ginestet S. Durability and stability of an ettringite-based material for thermal energy storage at low temperature. *Cement and Concrete Research*. 2017, vol. 99, pp. 106–115.
25. Huang C.P. *The Chemistry and Physics of Nano-Cement*. University of Delaware, 2006, 27 p.
26. Riera J.D. A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant Safety Against Accidental Aircraft Impact. *Nucl. Engng. and Des.* 1980, vol. 57, pp. 193–206.
27. Cadoni E., Caverzan A. and di Prisco M. Behaviour of HPFR Cementitious Composites. *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel University Press, Kassel, Germany, 2008, pp. 743–750.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Krivenko P. V., Petropavlovskii O. N., Vozniuk G. V., Pushkar V. I. Constructive properties of the concretes made with alkali-activated cements of new generation. *First Intern. Conf. on Advances of Chemically-activated Materials (CAM' 2010 – China)*. Jinan, Shandong, China, 2010. Pp. 139–146.
2. Omelchuk V., Guang Y., Runova R., Rudenko I. Shrinkage behavior of alkali-activated slag cement pastes. *Key Engineering Materials*. Vol. 761. Switzerland, 2018. Pp. 45–48.
3. Krivenko P., Runova R., Rudenko I., Konstantynovskiy O. Potential of alkali activated portland cement-based dry mixes for anchoring application. *NTCC2014 : International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete*. Brno University of Technology, 2014. Pp. 123–126.
4. Croymans T., Schroevers W., Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A., Hult M., Marissens G., Lutter G., Schreurs S. Radiological characterization and evaluation of high volume bauxite residue alkali activated concretes. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. № 168. Pp. 21–29.
5. Krivenko P. Why alkaline activation – 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2017. № 8 (3). Pp. 323–333.
6. Varabash I., Harashchenko D. Mechanoactivation of portland cement in the technology of manufacturing the self-compacting concrete. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 3 (6). С. 12–17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_3%286%29_3
7. Рунова Р. Ф., Гоц В. І., Назаренко І. І., Сівко В. Й., Шилюк П. С., Старчук В. Н., Братчун В. І., Плугів А. М., Саницький М. А. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження у будівництво. Київ : УВПК «ЕксОб», 2008. 360 с.
8. Hedvall J. A., Wikdahl L. Zeitschrift für Elektrochemie und Physikalische. *Chemie*. 1940. № 46. Pp. 455–458.
9. Шабанова Г. М., Попсуй К. В., Марков Д. Ю. та ін. Безклінкерні в'язучі матеріали лужної активізації. *Вестник НТУ ХПИ : Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2010. № 52.
10. Mechanical powder production process boosts surface engineering application. *Metallurgia*. 1994. Vol. 61. № 9. Pp. 273–274.
11. Крупа А. А., Городов В. С. Химическая технология керамических материалов : учеб. пособ. Киев : Высшая школа, 1990. 399 с.
12. Стрелов К. К., Мамыкин П. С. Технология огнеупоров. Москва : Металлургия, 1978. 376 с.
13. Бабков В. В., Полак А. Ф., Комохов П. Г. Аспекты долговечности цементного камня. *Цемент*. 1988. № 3. С. 14–16.
14. Тейлор Х. Химия цемента. Мир, 1996. 560 с.
15. Neville A. M., Brooks J. J. Concrete Technology. 2th ed. Harlow : Pearson, 2010. 442 p.
16. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. Москва, 1958. 75 с.
17. Комохов П. Г. Механико-энергетические аспекты процессов гидратации, твердения и долговечности цементного камня. *Цемент*. 1987. № 2. С. 20–22.
18. Ultra-High Performance Concrete : a State-of-the-Art Report for the Bridge Community. US Department of Transportation, 2003. 176 p.
19. Teichmann T., Schmidt M. Mix Design and Durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Proceedings of the 4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering*. Munich, 2002. Pp. 341–347.
20. Rohani A. B., Rosiyah Y., Gan S. N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. *Procedia Chemistry*. 2016. № 19. Pp. 189–195.
21. Hussein M. H., Jokhio G. A., Yahaya F. M., Humada A. M., Gul Y. The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. № 175. Pp. 26–40.
22. Li N., Farzadni N., Shi C. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 100. Pp. 214–226.
23. Li N., Shi C., Wang Q., Zhang Z., Ou Z. Composition design and performance of alkali-activated cements. *Materials and Structures. Materiaux et Constructions*. 2017. Vol. 50, iss. 3, № 178.
24. Ndiaye K., Cyr M., Ginestet S. Durability and stability of an ettringite-based material for thermal energy storage at low temperature. *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 99. Pp. 106–115.
25. Huang C. P. The Chemistry and Physics of Nano-Cement. University of Delaware, 2006. 27 p.
26. Riera J. D. A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant Safety Against Accidental Aircraft Impact. *Nucl. Engng. and Des*. 1980. Vol. 57. Pp. 193–206.
27. Cadoni E., Caverzan A., di Prisco M. Behaviour of HPFR Cementitious Composites. *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel University Press, Kassel, Germany, 2008. Pp. 743–750.

Надійшла до редакції: 12.03.2024.

УДК 550.34: 551.243: 550.835.2

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.152.1054

POSSIBLE CONSTRUCTION FEATURES OF EQUIPMENT FOR RADONOMETRY OF BOTTOM SEDIMENTS ON THE SEA SHELF DURING RESEARCH AT SHORE NPP SITES

SEDIN V.L.¹ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
ULIANOV V.Yu.², *Ass.*,
ZAHILSKYI V.A.³, *Ph. D., Assoc. Prof.*,
KOVBA V.V.^{4*}, *Ph. D., Assoc. Prof.*,
HORLACH S.M.⁵, *Ph. D., Assoc. Prof.*,
LUHOVSKA Yev.V.⁶, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

² Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: uluanovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

³ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: zahilskiy.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

^{4*} Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, +38 (096) 588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7888-4393

⁵ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: horlach.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6511-7574

⁶ Department of Engineering Geology and Geotechnics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: luhovska.yevheniia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0004-3643-3155

Abstract. Problem statement. Along with other natural gases that are freely discharged into the atmosphere in tectonic fault zones in Earth's crust, the best-known one is the radioactive gas Radon (²²²Rn). The properties of this gas, namely inertness, short half-life period (up to 3.8 days) and availability of progeny distinguish it from other gases, such as methane, hydrogen, helium, etc. Another problem is determining the activity of tectonic faults identified by seismic exploration works in the waters near sites of future shore NPPs or those under construction. All the existing devices for offshore works were analyzed. Their advantages and disadvantages, as well as their suitability for radon research, have been revealed. **Purpose of the article.** In the paper, the need is substantiated to introduce radonometry for seismotectonic studies at shore NPP sites located in the sea and ocean shelf zones. **Conclusions and results.** As a result of analyzing the systems available for these purposes, it was deemed necessary to develop new types of devices different from the already existing ones and, for good measure, experimental prototypes. Moreover, there have been proposed their possible layout schemes. Layout schemes of specialized devices for radon research on the shelf, just as the need for such research, have been proposed and justified for the first time. Offshore radonometry conducted to identify the tectonic activity of revealed fault zones can become another additional factor that increases the operational reliability of future NPPs and, first of all, their hydraulic structures.

Keywords: *NPP; shelf; radon; engineering surveys; radonometry; underwater vehicle*

МОЖЛИВІ КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РАДОНОМЕТРІЇ ДОННИХ ОСАДІВ МОРСЬКОГО ШЕЛЬФУ ПРИ ВИШУКАННЯХ НА МАЙДАНЧИКАХ БЕРЕГОВИХ АЕС

СЕДІН В. Л.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
УЛЬЯНОВ В. Ю.², *ас.*,
ЗАГІЛЬСЬКИЙ В. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,
КОВБА В. В.^{4*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ГОРЛАЧ С. М.⁵, *канд. техн. наук, доц.*,
ЛУГОВСЬКА Є. В.⁶, *асп.*

1. Кафедра інженерної геології та геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243
2. Кафедра інженерної геології та геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: uluanovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408
3. Кафедра інженерної геології та геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: zahilskyi.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X
- 4*. Кафедра інженерної геології та геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140
5. Кафедра інженерної геології та геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: horlach.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6511-7574
6. Кафедра інженерної геології та геотехніки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: luhovska.yevheniia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0004-3643-3155

Анотація. Постановка проблеми. Поряд з іншими природними газами, що вільно розвантажуються в атмосферу в зонах тектонічних розломів земної кори, найбільш відомий радіоактивний радон (^{222}Rn). Такі властивості цього газу як інертність, малий період піврозпаду (до 3,8 діб) та наявність дочірніх продуктів розпаду виділяють його серед інших газів, таких як метан, водень, гелій та ін. Іншою проблемою стало визначення активності виявлених сейсморозвідкою тектонічних розломів на акваторії поблизу майданчиків майбутніх або АЕС, що будуються (берегового типу). Проаналізовано всі існуючі пристрої для роботи в акваторіях. Виявлено їх переваги та недоліки, як і придатність для досліджень радону. **Мета статті.** Обґрунтовується необхідність запровадження радонометрії для сейсмодіагностичних досліджень на майданчиках АЕС берегового типу, розташованих у шельфовій зоні морів та океанів. **Висновки.** В результаті аналізу існуючих систем для цих цілей визнано необхідним розробити пристрої нового типу, відмінні від існуючих і до того ж дослідних зразків. Також запропоновано можливі компоновальні схеми пристроїв нового типу. Вперше запропоновано компоновальні схеми спеціалізованих пристроїв для радонових досліджень на шельфі. Обґрунтовано необхідність подібних досліджень. Проведення радонометрії в акваторії з метою виявлення тектонічної активності виявлених розломних зон може стати ще одним додатковим фактором, що підвищує експлуатаційну надійність майбутніх АЕС, в першу чергу – їх гідротехнічних споруд.

Ключові слова: АЕС; радон; інженерні вишукування; радонометрія; підводний апарат

Formulation of the problem. Along with other natural gases that are freely discharged into the atmosphere in tectonic fault zones in Earth's crust, the best-known one is the radioactive gas Radon (^{222}Rn). The properties of this gas, namely inertness, short half-life period (up to 3.8 days) and availability of progeny distinguish it from other gases, such as methane, hydrogen, helium, etc. These properties of radon served as the basis for its use as one of the available indicators in establishing the activity rate of tectonic fault zones, especially at nuclear power plant sites [1]. During numerous field studies in the 70–80s of the last century, a direct connection was established between the intensity of radon anomalies and geodynamic processes in tectonic fault zones. This phenomenon served as the basis to start up a fundamentally new direction of applied research in the field of engineering geology: – structural geodynamic mapping (SGM) [2]. A method being similar in

objectives and tasks is a method of structural thermal-and-atmospheric and hydro-geochemical investigations developed and used by the Marine Research Department of the Institute of Geological Sciences (IGS) of the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU) [9]. Nevertheless, despite numerous facts of quite successful application of this method, radon has so far received undeservedly little attention as a possible indicator of changes in the stressed state of subsoil at sites of nuclear power plants being designed, under construction and in operation. This was especially true for measurements of radon concentrations in groundwater, where the method of measuring radon in groundwater for the purposes of geodynamic and earthquake forecast has yet to prove its value, although individual studies in this area have still been carried out [3; 4].

Another problem is determining the activity of tectonic faults identified by seismic

exploration works in the waters near sites of future shore NPPs or those under construction. That is, the matter is radon measurements in bottom sediments in the sea and ocean shelf waters above fault zones, as well as large storage reservoirs and lakes. It should be noted that according to the number of publications, radon measurements in the marine environment were actively carried out in the 60–70s of the previous century, but after that period the interest in this area decreased significantly. The problem of measuring radon in bottom sediments on the shelf for the purposes of seismotectonics, when choosing sites for nuclear power plants, is generally quite new and associated, unlike determining radon on land, with a number of objective technical difficulties, given the depth of upcoming investigations. This paper is devoted to this topic.

The purpose of the article. In the paper, the need is substantiated to introduce radonometry for seismotectonic studies at shore NPP sites located in the sea and ocean shelf zones.

Materials and Methods. Methods used at shallow depths near the coastline are described in a number of papers [5; 7; 15]. In such studies, bottom sediments are collected using a bucket sampler or a tubular gravity column, with a subsequent complex process of determining the radon concentration in pore fluid or soil particles directly on the ship or in an onshore laboratory. Certainly, such determinations are discrete and such technology is far from optimal one existing for mass determinations during surveys.

A different way was chosen by a number of researchers, in particular that for the in-situ continuous determination of radon concentrations in the water of submarine sources [6]. For example, one such system consists of a submerged module using a commercial radon sensor with a pulsed ionization chamber and gas separation membrane module to provide high accuracy and high resolution. In operating mode, water is continuously pumped through a membrane contactor, in which radon dissolved in water is degassed and balanced by a closed air circuit.

The membrane physically separates water and air. Further, after dehumidification, the balanced air is directed to an active radon detector. Two back valves and a water leakage detector prevent unexpected reverse flow. The detector monitors the temperature, humidity and pressure in the inner chamber. The submerged module can be powered by either a 12V-battery or an external AC power supply via an eight-wire waterproof cable. The maximum power consumption is ~33 W when the water and air pumps are running. Once communication is established between the underwater detection unit and shore-monitoring module, no additional intervention of the operator will be required. Data collection (no more than one minute) can be programmed for any user-desired integration interval, depending on the expected radon concentration in samples. For each time step, the user receives data on radon activity, temperature, humidity and pressure, which are automatically stored in a memory device inside the shore monitoring module. Data set transmission, as well as system management, can be controlled using the Wi-Fi-based remote terminals. This experimental setup uses proprietary software to visually monitor changes in radon activity on a real-time basis from a remote laboratory located 20 km away. During the tests, the installation operated continuously over 100 hours. However, this case also touched shallow depths (up to 2.5 m), although the creators of the system claimed that it could operate at depths of up to 40 m and even be part of an autonomous underwater vehicle. In addition, the described device is a purely experimental installation, consisting of commercially available components, and moreover, requiring the presence of a coastal stationary base, which limits the offshore survey area. As it was revealed when testing, the turbid water can clog the membrane relatively quickly and, therefore, contactors typically require the rather clean water with a low concentration of suspended solids, which in itself is unlikely in near-bottom conditions, and even more in the bottom environment. To reduce the likelihood of clogging the extraction module with suspended solids while in

operation, a pre-filtration device with a 45 mm-microfilter was installed at the water inlet to the submerged module system. In some situations, it was found necessary to install a multi-stage filtration, which seriously complicates and increases the cost of a purely experimental design. Other devices of this kind were developed.

Some attempts have also been made to measure radon activity in situ using the underwater gamma counters based on NaI (TI) scintillators or HPGe (high-purity germanium) detectors. However, NaI (TI) applications have high background and low resolution, and HPGe systems are too expensive. There is evidence of using KATERINA-type sensor devices in water areas, which take into account the activity of radon progeny (^{214}Pb , ^{214}Bi) [16]. Nevertheless, the significant dimensions of devices do not yet allow them to be deepened into bottom sediments by more than a few centimeters.

It should be noted that individual elements of such modules were created in the

Department of Geo-Ecology and Exploratory Research of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. An application no. a 201509394 dd. 30.09.2015 was submitted to obtain a patent of Ukraine for one of these devices: – a bathometer-degasser (see Fig. 1). Actually, it has undergone the formal examination No. 2064/38/16 dd. 28.01.2016 [8]. However, in addition to unsolved technical problems, the seawater samples were collected and degassed for various purposes by a device developed under the guidance of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine (PDBK-2M), and this was only done from the bottom water, and not from the layer of sediments, i.e. the resulting values were initially subject to a number of disturbing factors and distortions. The device itself needed some correcting works. Notwithstanding, it is also possible to develop other design schemes (Fig. 1).

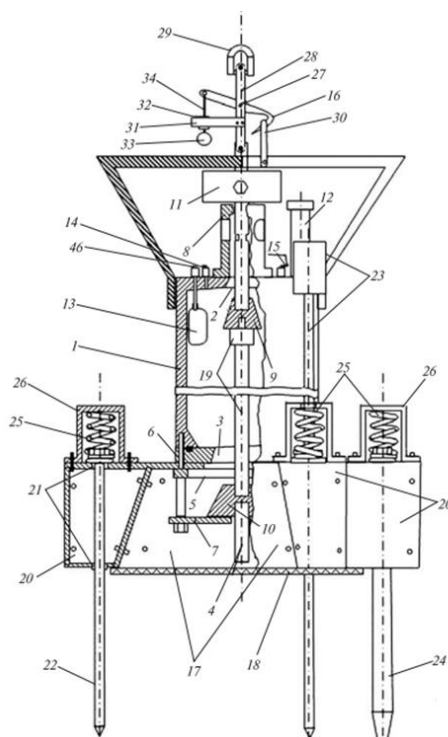


Fig. 1. Geological complex for studying water bottoms (including additional elements: 1 – sealed body, 2, 3 – upper and lower parts of the body, 4 – rod, 5 – platform, 6 – flange, 7, 8 – upper and lower parts of the guide bushing, 9, 10 – sampler-degasser valves, 11 – cargo, 12 – pressure compensator, 13 – device for changing the sample volume, 14 – gas tap, 15 – water tap, 16 – hook kicker, 17 – water intake, 18 – filter, 19 – stock, 20 – plate rectangular-trapezoidal consoles, 21 – fixing holes, 22 – stabilizers, 23 – geological meter, 24 – bottom soil sampler, 25, 26 – shock absorber, 27 – axis, 28 – cheeks, 29 – bracket, 30 – loop, 31 – additional console, 32 – bushing, 33 – counterweight, 34 – flexible cable, 46 – tap. The photo is taken from publicly available sources

In particular, it is a known fact that there exist two patents for similar sampling systems based on the multi-chamber syringe-type boxes: the US patent 2006090894 МПК E21B 49/08, and the RU patent (11) 2 446 388(13) C1 (see Fig. 2, 3). However, the analysis of samples in all cases was carried out already on the surface.

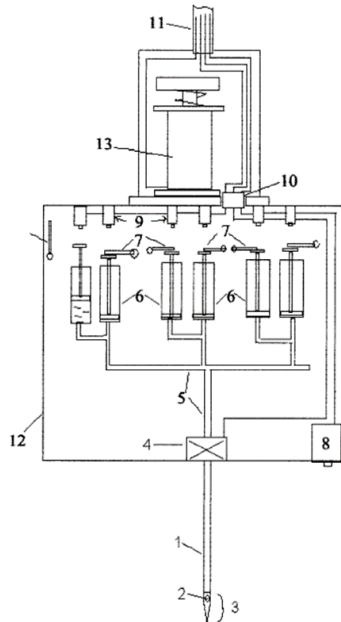


Fig. 2. Scheme of a probe for sampling pore fluid from bottom sediments: 1 – sampling tube; 2 – water inlet; 3 – filter; 4 – solenoid valve; 5 – hose for connecting syringes; 6 – syringes; 7 – spring-loaded locks; 8 – pressure control device; 9 – stoppers for full travel of syringe stocks with limit switches; 10 – connector joining electrical components of the sealed container via the cable-cord 11 with the control unit (not shown in Figure); 12 – sealed container body; 13 – immersion mechanism. The photo is taken from publicly available sources



probe



probe tip

Fig. 3. Probe for sampling pore water from bottom sediments. (The photo is taken from publicly available sources)

Research results. Thus, based on the aforementioned with a view to solve problems of seismotectonics, one can talk about creating a submerged laboratory module with a sealed chamber, capable to operate at depths of up to 200 m. The module is lowered to a point either independently or from on board a research vessel (i. e., an instrument of the so-called inert type). Power supply sources are located on the platform. However, the option of supplying power via a cable from the surface cannot be ruled out. The operation of the module at the bottom can be controlled by autonomous small-sized submersible robotic platforms. The inert-type module can consist of the following basic components:

- a platform with a sealed instrument capsule and a sluice device for the forced overboard discharge (as an option) of an already studied portion of pore water at depth, and a system for pipeline purging from high-pressure air cylinders, and a system for stabilizing /reducing pressure in the capsule body, and membrane filters, and an energy supply system, and a radon-content analysis unit of selected configuration (with a pulse ionization chamber, or with the use of underwater gamma counters based on NaI (Tl) scintillators, or HPGe-detectors). In the latter case, the introduction of a gamma counter into the bottom soil is possible when it is placed in the lower part of the auger column modified for marine conditions of the so-called sound procedure installation. It is also possible to appropriately use the modified commercial radon detectors, such as RAD7 (<https://durrige.com>) or RTM-1688 (SARAD GmbH), although there is no information about the use of these devices on underwater vehicles at sea depths of up to 200 m;

- a sampling device for collecting water samples in the environment of bottom sediments (a press-in type probe with a cone tip, or a rotary auger type probe additionally equipped, if necessary, with a gamma counter). The submersible device can be either built into a sealed capsule or externally coupled with it. It must be structurally possible to collect and store the pore fluid samples at 2 horizons as a

minimum, in depth of submerging the probe at a specific point;

- a system for stabilizing and anchoring the platform (in the case of a lightweight structure), as well as preventing the overturn or lurch;

- a weighting load with the possibility of its separation in emergency cases (reinforced concrete structures, cast iron shot or ingots);

- lighting, video surveillance and communication systems.

In particular, a modified platform for the seabed cone penetration testing at depths of up to 300 m, for example ROSON 100 (see Fig. 4) manufactured by the Dutch company “A.P. van den Berg” [10], can be used as a basis. But the cone probe for CPT in this platform must be adapted to sample pore fluid when pressed-in exactly at the desired level, i.e. equipped with a solenoid valve. The diameter of the probe itself can be increased, since it is very difficult to create a similar system with valves and with a standard CTP-probe diameter of 36 mm. It is the pressed-in probe or otherwise submerged one, for example the drilled-in probe, that will presumably be the most complex part of this device.

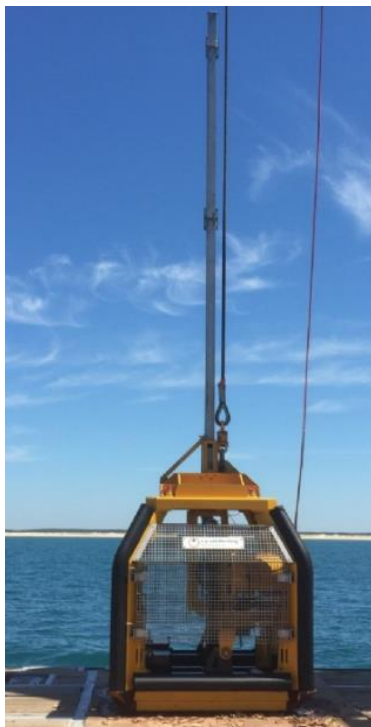


Fig. 4. Underwater CPT- penetrometer. The photo is taken from publicly available sources

In addition to the system for collecting and analyzing the pore water samples for radon, the platform itself can be equipped with auxiliary sensors (including a gas chromatography unit), which will significantly expand the list of recorded parameters, although it will lead to an inevitable increase in the cost of the entire system. However, a combined option is also possible, when the sampling system is installed on the platform in addition to the main CPT-equipment. A sampler for pore fluid from loose bottom sediments should initially ensure sampling from depths of at least 0.5–1 m below the reference seabed point. The converted bottom stations from LDEO and SIO Companies (USA), or ones similar to them, can also be considered as a basis.

For obvious reasons, the autonomous option will be much more complicated and expensive, because it must be additionally equipped with an ascent-submergence system, a point stabilization system, and a radar for determining the thickness of bottom sediments and their material composition, as well as an orientation system and drop weight. Moreover, there must be provided means to search for an emersed vehicle, made in the shape of a flashing beacon and/or an active radar reflector. Also, as in the inert version, it is possible to combine such a platform with other equipment-specific complexes for studying bottom sediments of marine areas [11]. The option of equipping submerged modules of both types with radon analyzers based on HPGe or other types cannot be ruled out, even despite its high cost. However, in a technical sense, this option will most likely be much easier to implement in practice.

As an intermediate option, a battery-type submersible ampulized system can be proposed. In this case, after sampling at selected points in the shelf area, ampoules filled with pore fluid rise to the surface along with the platform, or float to the surface in the certain sequence, as they are filled, with the help of additional equipment. As soon as they are delivered on board the vessel, they will immediately be sent to the laboratory for analysis. As a matter of course, the floating part

is equipped with a detection device (a flashing light and a radio signal for direction finding).

It is certain that when using devices of both types, there is a necessity to take into account not only the topography and structure of seabed, but also the composition and thickness of bottom sediments. The presence of the silt thick mass of soupy consistency will be an obstacle to the planned measurements. In such cases, an indirect additional option for solving this problem can be the use of modules for continuous registration of radon in the near-bottom part of the shelf, located on the so-called gliders [12–14]. In particular, determining the radon content in the near-bottom part of the shelf may allow roughly outlining the tectonic disturbance at the stage of preliminary searches, especially that in the active phase, certainly if the “picture” is not distorted by gas seeps, near-bottom flows or submarines sources. However, the disadvantage of this scheme is the revealed sharp difference in the radon content within the bottom sea waters and bottom sediments.

Scientific Novelty and Practical Significance. When conducting surveys at shore NPP sites, it is necessary, apart from radonometry on land, to carry out similar works in the water area, which, however, is associated with a number of difficulties of both technical and methodological nature.

It is recognized that for radonometry of the shelf zone conducted with the aim of seismotectonics during the construction of shore NPPs, equipment of a completely different type is required, alternatively to numerous existing installations used in oceanology and marine geology. Although, it is quite acceptable to use individual components of available devices that have been already tested. The possible schemes for such devices have been proposed.

Radonometry in the water area to identify the tectonic activity of discovered fault zones can become another additional factor that increases the operational reliability of future nuclear power plants.

Conclusion

When conducting surveys at shore NPP sites, it is necessary, apart from radonometry on land, to carry out works in the water area.

For radonometry of the shelf zone in the aims of seismotectonics, it is necessary to have equipment of a completely different type alternatively to numerous existing installations used in oceanology and marine geology. The platform of such a device can be of either active (self-propelled) or passive type (connected to the vessel). The instrumentation can be based both on existing commercial components that are already used, and on newly created overspecialized devices. The own schemes of such devices have been proposed.

For works in water areas, it also seems necessary to make adjustments to the methodology of such research, especially with regard to determining the activity of tectonic faults by radonometry methods, if they will be identified in the study area. It is not inconceivable that the version of the universal scale of tectonic fault activity in Earth’s crust developed for land can be adjusted for the conditions of water areas.

However, there is no doubt that radonometry in water areas to identify the tectonic activity of discovered fault zones can become another additional factor that increases the safety of sites and, as a consequence, the operational reliability of both nuclear power plants under construction and those already in operation. Moreover, such research is primarily required for sites located in highly seismic regions.

REFERENCES

1. Sedin V.L., Ulanov V. and Bicus K.M. *Shkala otsenki aktivnosti tektonicheskikh razlomov zemnoj kory po intensivnosti radonovydeleniya iz nedr na ploshhadkah stroyashhihsya i dejstvuyushhih AES* [Scale assessment of active tectonic faults of the crust on the Intensity of radon exhalation from the depths to the construction site and the existing energy facilities]. *Georysyk* [Heorisk]. 2015, no. 4, pp. 48–52. (in Ukrainian).
2. Gorbushina L.V. and Ryaboshan Y.S. *Ehmanacionnyj metod indikacii geodinamicheskikh processov pri inzhenerno-geologicheskikh izyskanijakh* [Emanation method indication of geodynamic processes in geotechnical investigations]. *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology]. 1975, no. 4, pp. 106–112. (in Ukrainian).
3. Shigeki Tasaka and Yoshimi Sasaki. Observations of Underground Water Radon Concentration at the Kamioka Mine, Gifu Prefecture. Faculty of Education, Gifu University, Yanagido 1-1. Gifu 501-11, 2–45, Japan, 1992, 9 p.
4. Maho Matsumoto, Yumi Yasuoka, Yui Takakaze, Masahiro Hosoda, Shinji Tokonami, Kazuki Iwaoka and Takahiro Mukai. Evaluation of radon concentration measurements in water using the radon degassing method. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2022, 6 p.
5. Munaf Qasim Jaber, Abdul. R.H. Subber and Noori H.N. Al-Hashimi. Radon Concentrations in the Marine Sediments of Khor-Abdulla Northern West of the Arabian Gulf. *International Journal of Physics*. 2015, vol. 3, no. 6, pp. 239–243.
6. Zhao S., Li M., Burnett W.C., Cheng K., Li C., Guo J., Yu S., Liu W., Yang T., Dimova N.T., Chen G., Yu Z. and Xu B. In-situ radon-in-water detection for high resolution submarine groundwater discharge assessment. *Front. Mar. Sci.* Vol. 9, 2022, p. 1001554.
7. *Heolohichni, heoekolohichni, hidroakustichni, hidroekolohichni doslidzhennya shel'fu ta kontynental'noho skhylyu ukrayins'koho sektora Chornoho morya* [Geological, geoecological, hydroacoustic, hydroecological studies of the shelf and continental slope of the Ukrainian sector of the Black Sea]. Ed. By A.Yu. Mitropolsky, Kyiv, 2013, 150 p. (in Ukrainian).
8. Bagriy I.D. and Kiryushchenko I.G. *Modul'no-blochnyy kompleks dlya issledovaniya morskogo dna i pridonnykh vod* [Modular-block complex for studying the seabed and bottom waters]. *Geologiya i poleznyye iskopayemye Mirovogo okeana* [Geology and Minerals of the World Ocean]. 2016, no. 4, pp. 128–134. (in Russian).
9. Bagriy I.D., Dubosarsky V.R. and Zhalovsky V.P. *Primeneniye metodiki strukturno-termo-atmogidrogeokhimicheskikh issledovaniy (STAGI) s tsel'yu poiskov zalezhey uglevodorodov i otsenki ekologicheskogo sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Application of the methodology of structural-thermo-atmogidrogeochemical research (STAGI) for the purpose of searching for hydrocarbon deposits and assessing the ecological state of the environment]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchenoy 215-letiyu so dnya rozhdeniya I. Domeiko* [Materials of the International Scientific Conference dedicated to the 215th anniversary of the birth of I. Domeiko]. Minsk, 2017, pp. 93–95. (in Russian).
10. Deep Water ROSON 100 the versatile seabed CPT system for ultra-deep water. URL: [https://OffR3_0615_Deep_Water_ROSON_100_seabed_CPT_system%20\(4\).pdf](https://OffR3_0615_Deep_Water_ROSON_100_seabed_CPT_system%20(4).pdf)
11. Gonchar A.I., Fedoseyev S.G., Shlychek L.I. and Shundel A.I. *Bahatotsil'ovyy avtomatyzovanyy modul'no-blochnyy informatsiyno-vymiryval'nyy kompleks dlya monitorynhu akvatoriyi* [Multipurpose automated modular-block information and measurement complex for water area monitoring]. *Hidroakustichnyy zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen' Svitovoho okeanu)* [Hydroacoustic Journal (Problems, Methods and Means of Ocean Research)]. 2012, no. 9, pp. 97–102. (in Ukrainian).
12. Brückmann W., Leibold P., Schmidt M., Al Balushi H. and Al Abri O. In Using an Autonomous Wave Glider to Detect Seawater Anomalies Related to Submarine Groundwater Discharge – Engineering Challenge. AGU Fall Meeting, GEOMAR, 2017.
13. Thomas Müller, Jonas Gros, Patrick Leibol, Hajar Al-Balushi, Eric Petermann, Mark Schmidt, Warner Brückmann, Mohammed Al Kindi and Omar S. Al-Abri Autonomous Large-Scale Radon Mapping and Buoyant Plume Modeling Quantify Deep Submarine Groundwater Discharge : a Novel Approach Based on a Self-Sufficient Open Ocean Vehicle. *Environ. Sci. Technol.* 2023, no. 57, pp. 6540–6549.
14. Al Balushi H. Detecting Submarine Groundwater Plumes in the Salalah Area : a Radon Tracer and Numerical Integral Plume Model. Master Thesis, GEOMAR, 2019, 70 p.
15. Collection and preparation of bottom sediment samples for analysis of radionuclides and trace elements. IAEA. Vienna, 2003, 130 p.
16. Tsabaris C., Androulakaki E.G. and Alexakis S. An Optimized Quantification Method for Marine Radioactivity Measurements : Application in the Southern Caspian Sea Using the KATERINA Underwater γ -Spectrometer. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023, no. 11 (4), p. 725.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Седін В. Л. Ульянов В. Ю., Бікус К. М. Шкала оцінювання активності тектонічних розломів земної кори за інтенсивністю радоновиділення застосування для об'єктів АЕС. *Георизик*. 2015. № 4. С. 48–52.

2. Горбушина Л. В., Рябоштан Ю. С. Еманацийний метод індикації геодинамічних процесів при інженерно-геологічних дослідженнях. *Советская геология*. 1975. № 4. С. 106–112.
3. Shigeki Tasaka, Yoshimi Sasaki. Observations of Underground Water Radon Concentration at the Kamioka Mine, Gifu Prefecture. Faculty of Education, Gifu University, Yanagido 1-1. Gifu 501-11, 2–45, Japan, 1992. 9 p.
4. Maho Matsumoto, Yumi Yasuoka, Yui Takakaze, Masahiro Hosoda, Shinji Tokonami, Kazuki Iwaoka, Takahiro Mukai. Evaluation of radon concentration measurements in water using the radon degassing method. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2022. 6 p.
5. Munaf Qasim Jaber, Abdul. R. H. Subber, Noori H.N. Al-Hashimi. Radon Concentrations in the Marine Sediments of Khor-Abdulla Northern West of the Arabian Gulf. *International Journal of Physics*. 2015. Vol. 3, № 6. Pp. 239–243.
6. Zhao S., Li M., Burnett W. C., Cheng K., Li C., Guo J., Yu S., Liu W., Yang T., Dimova N.T., Chen G., Yu Z., Xu B. In-situ radon-in-water detection for high resolution submarine groundwater discharge assessment. *Front. Mar. Sci.* 9. 2022. P. 1001554.
7. Геологічні, геоекологічні, гідроакустичні, гідроекологічні дослідження шельфу та континентального схилу українського сектора Чорного моря. Під ред. А. Ю. Митропольського. Київ, 2013. 150 с.
8. Багрий И. Д., Кирюченко И. Г. Модульно-блочный комплекс для исследования морского дна и придонных вод. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2016. № 4. С. 128–134.
9. Багрий И. Д., Дубосарский В. Р., Жаловский В. П. Применение методики структурно-термоатмогидрогеохимических исследований (СТАГИ) с целью поисков залежей углеводородов и оценки экологического состояния окружающей среды. *Материалы Международной научной конференции, посвященной 215-летию со дня рождения И. Домейко*. Минск, 2017. С. 93–95.
10. Deep Water ROSON 100 the versatile seabed CPT system for ultra-deep water. URL: [https://OffR3_0615_Deep_Water_ROSON_100_seabed_CPT_system%20\(4\).pdf](https://OffR3_0615_Deep_Water_ROSON_100_seabed_CPT_system%20(4).pdf)
11. Гончар А. І., Федосєнков С. Г., Шличек Л. І., Шундель А. І. Багатоцільовий автоматизований модульно-блочний інформаційно-вимірювальний комплекс для моніторингу акваторії. *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*. 2012. № 9. С. 97–102.
12. Brückmann W., Leibold P., Schmidt M., Al Balushi H., Al Abri O. In Using an Autonomous Wave Glider to Detect Seawater Anomalies Related to Submarine Groundwater Discharge – Engineering Challenge. AGU Fall Meeting. *GEOMAR*. 2017.
13. Thomas Müller, Jonas Gros, Patrick Leibol, Hajar Al-Balushi, Eric Petermann, Mark Schmidt, Warner Brückmann, Mohammed Al Kindi, Omar S. Al-Abri Autonomous Large-Scale Radon Mapping and Buoyant Plume Modeling Quantify Deep Submarine Groundwater Discharge : a Novel Approach Based on a Self-Sufficient Open Ocean Vehicle. *Environ. Sci. Technol.* 2023. № 57. Pp. 6540–6549.
14. Al Balushi H. Detecting Submarine Groundwater Plumes in the Salalah Area : a Radon Tracer and Numerical Integral Plume Model, Master Thesis. *GEOMAR*. 2019, 70 p.
15. Collection and preparation of bottom sediment samples for analysis of radionuclides and trace elements. *IAEA*. Vienna, 2003. 130 p.
16. Tsabaris C., Androulakaki E. G., Alexakis S. An Optimized Quantification Method for Marine Radioactivity Measurements : Application in the Southern Caspian Sea Using the KATERINA Underwater γ -Spectrometer. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. № 11 (4). P. 725.

Надійшла до редакції: 21.02.2024.

Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах,
несуть автори.

Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Комп'ютерну верстку виконано в редакційно-видавничому відділі ПДАБА.

Адреса редакції:

✉ вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Україна, м. Дніпро
кімната 501 (відповідальний секретар)

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Підписано до друку 05.04.2024 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 10,00. Умовн. фарб.-відб. арк. 10,00.

Обл.-видавн. арк. 20,00. Наклад 50 прим. Зам. 208

Authors are responsible for the accuracy of the information
contained in the printed materials.

Editors do not always agree with the author's point of view.

Desktop publishing is performed in the Editorial Department of PSACEA.

Editorial address:

✉ room 501 (Executive Secretary)

24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Sent to press on 05 April 2024. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 10,00. Conventional colour imprints 10,00.

Publisher's signatures 20,00. Number of copies 50. Order 208