

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»**

# **ВІСНИК**

**ПРИДНІПРОВСЬКОЇ  
ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ**

**Заснований у травні 1997 року**

**№ 1 (249-250)  
січень – лютий 2019**

**Дніпро 2019**

## **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ :**

<i>Головний редактор</i>	В. І. Большаков, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро
<i>Заступник головного редактора</i>	В. В. Данішевський, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро
<i>Відповідальний секретар</i>	О. А. Тимошенко, к-т техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро
<i>Видавничий редактор</i>	О. А. Тимошенко, к-т техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро

## **ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:**

А. С. Беліков, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. А. І. Білоконь, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. В. С. Вахрушева, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. Д. Ф. Гончаренко, д-р техн. наук, Харківський національний університет будівництва та архітектури, Харків. С. І. Губенко, д-р техн. наук, Національна металургійна академія України, Дніпро. В. М. Дерев'янка, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Є. А. Єгоров, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. Є. І. Заяць, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. Ю. О. Кірічек, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. Т. С. Кравчуновська, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. В. Л. Красовський, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. В. З. Куцова, д-р техн. наук, Національна металургійна академія України, Дніпро. Д. В. Лаухін, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. А. В. Мішутін, д-р техн. наук, ДВНЗ «Одеська державна академія будівництва та архітектури», Одеса. В. Р. Млодецький, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. М. І. Нетеса, д-р техн. наук, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро. Т. Д. Нікіфорова, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. В. Д. Петренко, д-р техн. наук, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро. С. З. Поліщук, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. М. В. Савицький, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА (Дніпро). В. Л. Седін, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. С. О. Слободянюк, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. Г. Д. Сухомлин, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. Л. А. Хмара, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. С. В. Шатов, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, Дніпро. М. В. Шпирько, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Едіт Барна, к-т техн. наук, Будапештський технічно-економічний університет, Будапешт (Угорщина). Анна Бач, д-р архітектури, Вроцлавський університет, Вроцлав (Польща). Александр Корякінс, д-р техн. наук, Ризький технічний університет, Рига (Латвія). В. І. Куксенко, к-т техн. наук, Управління з атомної енергії Великобританії, Оксфорд (Великобританія).

Науково-практичний журнал входить	до переліку №1 наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та архітектури згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 07.10.2015 № 1021
Свідоцтво про Державну реєстрацію	друкованого засобу масової інформації – серія КВ № 22724-12624ПР – видане Міністерством юстиції України 4 травня 2017 р.
Засновник та видавець	Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Виходить 6 разів на рік
Рекомендовано до друку	вченою радою академії, протокол № 9 від 26.03.2019 р.
Сайт видання	<a href="http://visnyk.pgasa.dp.ua">http:// visnyk.pgasa.dp.ua</a>
Наукометричні бази та електронні бібліотеки, в яких зареєстрований науково-практичний журнал	<i>Інформаційно-аналітичні системи:</i> РІНЦ (eLibrary), InfoBase Index (IBI Factor = 3,96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory, Indexing of International Research Journals (CiteFactor). <i>Електронні бібліотеки та пошукові системи:</i> Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CyberLeninka, OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського
	Художній і технічний редактор С. Д. Моїсеєнко Перекладач П. М. Стехна Редактор та коректор В. Д. Маловик

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«ПРИДНИПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»**

# **ВЕСТНИК**

**ПРИДНИПРОВСКОЙ  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**Основан в мае 1997 года**

**№ 1 (249-250)  
январь – февраль 2019**

**Днепро 2019**

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

<i>Главный редактор</i>	В. И. Большаков, д-р техн. наук, <i>ГВУЗ ПГАСА, Днепро</i>
<i>Заместитель главного редактора</i>	В. В. Данишевский, д-р техн. наук, <i>ГВУЗ ПГАСА, Днепро</i>
<i>Ответственный секретарь</i>	Е. А. Тимошенко, к-т техн. наук, <i>ГВУЗ ПГАСА, Днепро</i>
<i>Выпускающий редактор</i>	Е. А. Тимошенко, к-т техн. наук, <i>ГВУЗ ПГАСА, Днепро</i>

## **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

А. С. Беликов, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. А. И. Белоконь, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. В. С. Вахрушева, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Д. Ф. Гончаренко, д-р техн. наук, *Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков*. С. И. Губенко, д-р техн. наук, *Национальная металлургическая академия Украины, Днепро*. В. Н. Деревянко, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Е. А. Егоров, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Е. И. Заяц, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Ю. А. Киричек, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Т. С. Кравчуновская, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. В. Л. Красовский, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. В. З. Куцова, д-р техн. наук, *Национальная металлургическая академия Украины, Днепро*. Д. В. Лаухин, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. А. В. Мишутин, д-р техн. наук, *ГВУЗ «Одесская государственная академия строительства и архитектуры», Одесса*. В. Р. Млодецкий, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Н. И. Нетеса, д-р техн. наук, *Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепро*. Т. Д. Никифорова, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. В. Д. Петренко, д-р техн. наук, *Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепро*. С. З. Полищук, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Н. В. Савицкий, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. В. Л. Седин, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. С. А. Слободянюк, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Г. Д. Сухомлин, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Л. А. Хмара, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. С. В. Шатов, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Н. В. Шпирько, д-р техн. наук, *ГВУЗ ПГАСА, Днепро*. Эдит Барна, к-т техн. наук, *Будапештский технико-экономический университет, Будапешт (Венгрия)*. Анна Бач, д-р архитектуры, *Вроцлавский университет, Вроцлав (Польша)*. Александрс Корякинс, д-р техн. наук, *Рижский технический университет, Рига (Латвия)*. В. И. Куксенко, к-т техн. наук, *Управление атомной энергии Великобритании, Оксфорд (Великобритания)*.

Научно-практический журнал входит	в перечень № 1 научных профессиональных изданий Украины, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на получение ученых степеней доктора и кандидата технических наук и архитектуры в соответствии с приказом Министерства образования и науки Украины от 07.10.2015 № 1021
Свидетельство о Госрегистрации	печатного средства массовой информации – серия КВ № 22724-12624ПР – выдано Министерством юстиции Украины 4 мая 2017 г.
Основатель и издатель	Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» Выходит 6 раз в год
Рекомендовано к печати	ученым советом академии, протокол № 9 от 26.03.2019 г.
Сайт издания	<a href="http://visnyk.pgasa.dp.ua">http:// visnyk.pgasa.dp.ua</a>
Научометрические базы и электронные библиотеки, в которых зарегистрирован научно-практический журнал	<i>Информационно-аналитические системы:</i> РИНЦ (eLibrary), InfoBase Index (IBI Factor = 3,96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory Indexing of International Research Journals (CiteFactor). <i>Электронные библиотеки и поисковые системы:</i> Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CyberLeninka, OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Национальная библиотека Украины им. В. И. Вернадского
	Художественный и технический редактор С. Д. Моисеенко Переводчик П. М. Стехна Редактор и корректор В. Д. Маловик

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**

**STATE HIGHER EDUCATION INSTITUTION  
«PRYDNIPROVSKA STATE ACADEMY  
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE»**

**BULLETIN**

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

**SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL**

**Established in May, 1997**

**№ 1 (249-250)**  
**January – February 2019**

**Dnipro 2019**

## **EDITORIAL STAFF:**

<i>Chief Editor</i>	V. I. Bolshakov, Doctor of Engineering Science, <i>SHEI PSACEA, Dnipro</i>
<i>Deputy Chief Editor</i>	V. V. Danishevskiy, Doctor of Engineering Science, <i>SHEI PSACEA, Dnipro</i>
<i>Executive Secretary</i>	O. A. Tymoshenko, Candidate of Engineering Science, <i>SHEI PSACEA, Dnipro</i>
<i>Executive Editor</i>	O. A. Tymoshenko, Candidate of Engineering Science, <i>SHEI PSACEA, Dnipro</i>

## **MEMBERS OF EDITORIAL STAFF:**

A. S. Bielikov, Doctor of Engineering Science, *State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" (SHEI PSACEA), Dnipro.*  
A. I. Bilokon, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* V. S. Vakhrusheva, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* D. F. Honcharenko, Doctor of Engineering Science, *Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv.* S. I. Hubenko, Doctor of Engineering Science, *National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro.* V. M. Derevianko, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* Ye. A. Yehorov, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* Ye. I. Zaiats, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* Yu. O. Kirichek, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* T. S. Kravchunovska, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* V. L. Krasovskiy, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* V. Z. Kutsova, Doctor of Engineering Science, *National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro.* D. V. Laukhin, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* A. V. Mishutin, Doctor of Engineering Science, *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa.* V. R. Mlodetskiy, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* M. I. Netesa, Doctor of Engineering Science, *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro.* T. D. Nikiforova, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* V. D. Petrenko, Doctor of Engineering Science, *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro.* S. Z. Polishchuk, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* M. V. Savytskyi, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* V. L. Siedin, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* S. O. Slobodianiuk, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* H. D. Sukhomlyn, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* L. A. Khmara, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* S. V. Shatov, Doctor of Engineering Science, *SHEI PSACEA, Dnipro.* M. V. Shpyrko, Doctor of Engineering Science, *SHEI 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.*

Scientific-Practical Journal is included in	List No. 1 of scientific professional publications of Ukraine, where the results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Engineering Sciences and Architecture can be published according to the Resolution of the Ministry of Science and Education of Ukraine No.1021 dated 07.10.2015
Certificate of State Registration	of the Print Media – Series KV No. 22724-12624PR – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated May 04, 2017
Founder & Publisher	State Higher Education Institution «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture» Issued 6 times a year
Recommended for publication by	Academic Board of the Academy, No. 9 from 26.03.2019
Journal website	<a href="http://visnyk.pgasa.dp.ua">http:// visnyk.pgasa.dp.ua</a>
Placement of the scientific-practical journal in the international scientometric databases and e-libraries	Information and analytical systems: RSCI (Russian Science Citation Index), 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), CyberLeninka, OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Vernadsky National Library of Ukraine
	Art & Technical Editor S. D. Moiseienko Translator P. M. Stekhna Editor & Proofreader V. D. Malovyk

**НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Беліков А. С., Налісько М. М., Барташевська Л.І. ОЦІНКА ПОШИРЕННЯ УДАРНИХ ПОВІТРЯНИХ ХВИЛЬ У ПРОТЯЖНИХ СПОРУДАХ З УРАХУВАННЯМ ДИСИПАЦІЇ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ГАЗОВОГО ПОТОКУ.....	10
Ковальов В. В., Броневицький С. П., Протасова Є. В. РОЗВИТОК БУДІВЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ З УРАХУВАННЯМ ЗАВДАНЬ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ ДЕГРАДОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ .....	19
Парусов Е. В., Луценко В. А., Парусов О. В., Чуйко І. М., Голубенко Т. М., Сівак Г. І. РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ МАСИ АБО ТОВЩИНИ ШАРУ ОКАЛИНИ НА ПОВЕРХНІ БУНТОВОГО ПРОКАТУ ПІСЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ.....	33
Пшінько О.М., Руденко Д.В. ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МОДИФІКОВАНОЇ ЦЕМЕНТНОЇ СИСТЕМИ НА РАННІХ СТАДІЯХ ТВЕРДНЕННЯ БЕТОНУ .....	41
Колохов В. В., Кожанов Ю. О., Зезюков Д. М. ВПЛИВ РІВНЯ НАПРУГИ НА ШВІДКІСТЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ У БЕТОНІ КОНСТРУКЦІЙ.....	48
Тимошенко О. А., Колохов В. В., Тимошенко Л. О., Колохов О. В. ЗНИЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА НАВКОЛИШНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ГАЕС .....	58
Ганник М. І., Мартиш О. П., Гайдар А. М., Березюк А. М., Папірник Р. Б. ОПТИМАЛЬНИЙ ПІДБІР ПЛАСТИФІКАТОРА ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ.....	65
Нечепуренко Д.С., Павлов Ф. І., Михайлова І. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ В УКРАЇНІ.....	72
Махінько Н.О. ПРАКТИЧНІ ЗАДАЧІ ІМОВІРНІСНОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВОГО СИЛОСУ .....	78
Волчок Д.Л. ОЦІНКА РЕСУРСУ КОНСТРУКЦІЇ З ТРИЩИНОЮ НОРМАЛЬНОГО РОЗРИВУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ .....	86
Гончаренко Д. Ф., Менеїлюк І. О. РОЗРАХУНОК ОКУПНОСТІ БУДІВНИЦТВА ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ В УМОВАХ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ .....	94
Сакно О. П., Колеснікова Т. М., Олло В. П. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕХНІЧНИХ ВПЛИВІВ НА АВТОМОБІЛЬ .....	102

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Беликов А. С., Налисько Н. Н., Барташевская Л.И. ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН В ПРОТЯЖЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА.....	10
Ковалев В. В., Броневицкий С. П., Протасова Е. В. РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ ЗАДАЧ РЕВИТАЛИЗАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ .....	19
Парусов Э. В., Луценко В. А., Парусов О. В., Чуйко И. Н., Голубенко Т. Н., Сивак А. И. РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ИЛИ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ОКАЛИНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ БУНТОВОГО ПРОКАТА ПОСЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ.....	33
Пшинько А. Н., Руденко Д. В. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ НА РАННИХ СТАДИЯХ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА .....	41
Колохов В. В., Кожанов Ю. А., Зезюков Д. М. ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В БЕТОНЕ КОНСТРУКЦИЙ .....	48
Тимошенко Е. А., Колохов В. В., Тимошенко Л. А., Колохов А. В. СНИЖЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГАЭС.....	58
Ганник Н. И., Мартыш А. П., Гайдар А. М., Березюк А. Н., Папирнык Р. Б. ОПТИМАЛЬНЫЙ ПОДБОР ПЛАСТИФИКАТОРА ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ .....	65
Нечепуренко Д. С., Павлов Ф. И., Михайлова И. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕПЛОСЕТЕЙ В УКРАИНЕ .....	72
Махинько Н.А. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНОГО СИЛОСА .....	78
Волчок Д.Л. ОЦЕНКА РЕСУРСА КОНСТРУКЦИИ С ТРЕЩИНОЙ НОРМАЛЬНОГО РАЗРЫВА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	86
Гончаренко Д. Ф., Менеялюк И. А. РАСЧЁТ ОКУПАЕМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ .....	94
Сакно О. П., Колесникова Т. Н., Олло В. П. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА АВТОМОБИЛЬ .....	102



**SCIENTIFIC RESEARCH**

Bielikov A. S., Nalysko M. M., Bartashevska L.I.  
 ASSESSMENT OF THE DISTRIBUTION OF SHOCK AIR WAVES  
 IN EXTENDED STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE DISSIPATION  
 OF THE INTERNAL ENERGY OF THE GAS FLOW .....10

Kovalov V. V., Bronevytskyi S. P., Protasova Ye. V.  
 DEVELOPMENT OF A BUILDING COMPLEX TAKING INTO ACCOUNT THE TASKS  
 OF REVITALIZATION AND RECONSTRUCTION OF DEGRADED OBJECTS.....19

Parusov E. V., Lutsenko V. A., Parusov O. V., Chuiko I. N., Golubenko T. M., Sivak H. I.  
 DEVELOPMENT OF UNIVERSAL METHOD FOR DETERMINING SPECIFIC MASS  
 OR THICKNESS OF SCALE CRUST ON THE SURFACE  
 OF WIRE ROD AFTER CONTINUOUS COOLING .....33

Pshinko O. M., Rudenko D. V.  
 PECULIARITIES OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED  
 CONCRETE CEMENT SYSTEM AT THE EARLY STAGES OF HARDENING.....41

Kolokhov V. V., Kozhanov Yu. O., Zeziukov D. M.  
 INFLUENCE OF THE STRESS LEVEL ON THE velocity OF SPREAD  
 OF ULTRASONIC WAVES IN CONSTRUCTION CONCRETE .....48

Tymoshenko O.A., Kolokhov V.V., Tymoshenko L.O., Kolokhov O.V.  
 LOAD DECREASE ON THE ENVIRONMENT  
 IN THE BUILDING OF PUMP STORAGE PLANT (PSP).....58

Hannik M. I., Martysh O. P., Haidar A. M., Berezuk A. M., Papirnyk R. B.  
 OPTIMAL SELECTION OF A PLASTICIZER  
 FOR ASPHALT-CONCRETE COATING.....65

Nechepurenko D. S., Pavlov F. I., Mykhailova I. O.  
 RESEARCH OF TECHNICAL CONDITION AND METHODS OF HEAT NETWORKS  
 RESTORATION IN UKRAINE .....72

Makhinko N. O.  
 PRACTICAL TASKS OF PROBABILITY CALCULATION OF THE ELEMENTS OF STEEL SILOS.....78

Volchok D. L  
 ESTIMATION OF THE RESOURCE OF A STRUCTURE WITH THE TENSILE CRACK  
 ON THE BASIS OF FUZZY SIMULATION.....86

Honcharenko D. F, Meneiliuk I. O.  
 CALCULATION OF RESIDENTIAL COMPLEX PAYBACK  
 UNDER THE ORGANIZATIONAL RESTRICTIONS.....94

Sakno O. P., Kolesnikova T. M., Ollo V. P.  
 SIMULATION OF THE SYSTEM OF THE TECHNOLOGY  
 OF TECHNICAL INFLUENCES ON VEHICLE.....102

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК [534.222.2:622.812]:001.891.57

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.10.401

## ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН В ПРОТЯЖЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

БЕЛИКОВ А. С.<sup>1\*</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,  
НАЛИСЬКО Н. Н.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
БАРТАШЕВСКАЯ Л. И.<sup>3</sup>, *канд. ф.-м. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Дніпро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2</sup> Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38(0562) 47-16-01, e-mail: [59568@i.ua](mailto:59568@i.ua), ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> Кафедра физики, Национальный технический университет «Днепровская политехника», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, Дніпро, Украина, 49005, тел. +38 (0562) 46-90-22, e-mail: [bartashevskal.i@gmail.com](mailto:bartashevskal.i@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0205-2245

**Аннотация. Постановка проблемы.** Одним из условий безопасности при аварийных взрывах газозвушнх смесей является прогнозирование последствий таких ситуаций и принятие адекватных решений по локализации возникающих разрушающих факторов. Одним из основных поражающих факторов взрыва газозвушнх смесей в условиях протяженных сооружений выступает ударная воздушная волна. Для расчета взрывозащитных сооружений существует нормативная база, которая опирается на экспериментальные данные. Однако проблема установления достоверных параметров распространения ударной воздушной волны остаётся актуальной. Одним из перспективных направлений в расчете задач резко нестационарных процессов является использование численных методов. В настоящее время предложено решение задачи распространения взрывных волн в протяженных каналах с использованием схем численного счета уравнений газодинамики модифицированным методом «крупных» частиц. В задаче учитывается фактор падения энергии движения газового потока за счет вовлечения в движение возрастающих с расстоянием воздушных масс и за счет действия сил трения потока газа о стенки выработки. Дальнейшее развитие математической модели процесса распространения ударных воздушных волн происходит путем обоснования методики расчета параметров их затухания с учетом теплоотдачи потока в стенки канала. **Методика.** Процессы формирования и распространения ударной воздушной волны исследовались методом математического моделирования с использованием законов и уравнений механики сплошных сред и математической физики. Для численного решения дифференциальных уравнений, применялся метод крупных частиц (метод Давыдова). **Результаты.** Согласно результатам моделирования наибольшее относительное снижение происходит по параметру удельной полной энергии среды – на 5 %, давление на 3 %, плотность 2,5 %, падение скорости 2 %, при максимальном значении коэффициента теплообмена. Причем интенсивное нарастание теплопотерь происходит в зоне 3...5 длин участка газозвушной смеси, далее степень нарастания снижается и на всем остальном пути изменяется незначительно. При уменьшении коэффициента теплообмена вдвое зона нарастания коэффициента  $k_s$  увеличивается до 5...7  $x/L_D$ . **Научная новизна.** Исследовано влияние теплообмена ударной воздушной волны со стенками канала, что позволяет учитывать баланс диссипации полной энергии нестационарного газового потока. Получены закономерности изменения параметров ударной воздушной волны, которая распространяется в протяженном сооружении, обусловленные теплообменом газового потока со стенкой сооружения. **Практическая значимость.** Расширены возможности процедур прогнозирования параметров распространения ударных воздушных волн с помощью многофакторной математической модели.

**Ключевые слова:** внутреннее течение потока; граничные условия III рода; ударная воздушная волна; численный расчет; тепловой поток; внутренняя энергия

## ОЦІНКА ПОШИРЕННЯ УДАРНИХ ПОВІТРЯНИХ ХВИЛЬ У ПРОТЯЖНИХ СПОРУДАХ З УРАХУВАННЯМ ДИСПИПАЦІЇ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ГАЗОВОГО ПОТОКУ

БЕЛІКОВ А. С.<sup>1\*</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,  
НАЛИСЬКО М. М.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,

БАРТАШЕВСЬКА Л. І.<sup>3</sup>, канд. ф.-м. наук, доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: [59568@i.ua](mailto:59568@i.ua), ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> Кафедра фізики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 46-90-22, e-mail: [bartashevskal.i@gmail.com](mailto:bartashevskal.i@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0205-2245

**Анотація. Постановка проблеми.** Одна з умов безпеки під час аварійних вибухів газоповітряних сумішей - прогнозування наслідків таких ситуацій і прийняття адекватних рішень щодо локалізації виникаючих руйнівних факторів. Одним з основних вражаючих чинників вибуху газоповітряних сумішей в умовах протяжних споруд виступає ударна повітряна хвиля. Для розрахунку вибухозахисних споруд існує нормативна база, яка спирається на експериментальні дані. Однак проблема встановлення достовірних параметрів поширення ударної повітряної хвилі залишається актуальною. Перспективний напрямок у розрахунку завдань різко нестационарних процесів - це застосування числових методів. Наразі запропоновано розв'язання задачі поширення вибухових хвиль у протяжних каналах із використанням схем числового рахунку рівнянь газодинаміки модифікованим методом «великих» частинок. У задачі враховується фактор падіння енергії руху газового потоку за рахунок залучення в рух зростаючих із відстанню повітряних мас і за рахунок дії сил тертя потоку газу об стінки виробки. Подальший розвиток математичної моделі процесу поширення ударних повітряних хвиль відбувається шляхом обґрунтування методики розрахунку параметрів їх загасання з урахуванням тепловіддачі потоку в стінки каналу. **Методика.** Аналіз і узагальнення теоретичних досліджень, математичне моделювання газодинамічних процесів поширення вибухових повітряних хвиль у протяжних спорудах. Процеси формування і поширення ударної повітряної хвилі досліджувалися методом математичного моделювання з використанням законів і рівнянь механіки суцільних середовищ і математичної фізики. Для чисельного рішення диференціальних рівнянь, застосовувався метод великих часток (метод Давидова). **Результати.** Згідно з результатами моделювання найбільше відносно зниження відбувається по параметру питомої повної енергії середовища - на 5 %, тиск на 3 %, щільність 2,5 %, падіння швидкості 2 %, при максимальному значенні коефіцієнта теплообміну. Причому інтенсивне наростання тепловтрат відбувається в зоні 3...5 довжин ділянки газоповітряної суміші, далі ступінь наростання знижується і на всьому іншому шляху змінюється несуттєво. При зменшенні коефіцієнта теплообміну вдвічі зона наростання коефіцієнта  $k_s$  збільшується до 5...7  $x/L_D$ . **Наукова новизна.** Досліджено впливу теплообміну ударної повітряної хвилі зі стінками каналу, що дозволяє враховувати баланс дисипації повної енергії нестационарного газового потоку. Отримано закономірності зміни параметрів ударної повітряної хвилі, яка поширюється у протяжній споруді, обумовлені теплообміном газового потоку зі стінкою споруди. **Практична значимість.** Розширено можливості процедур прогнозування параметрів поширення ударних повітряних хвиль за допомогою багатфакторної математичної моделі.

**Ключові слова:** внутрішня течія потоку; граничні умови III роду; ударна повітряна хвиля; числовий розрахунок; тепловий потік; внутрішня енергія

## ASSESSMENT OF THE PROPAGATION OF SHOCK AIR WAVES IN EXTENDED STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE DISSIPATION OF THE INTERNAL ENERGY OF GAS FLOW

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

NALYSKO M.M.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.,

BARTASHEVSKA L.I.<sup>3</sup>, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Ass. Prof.

<sup>1\*</sup> Department of Life Safety, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2</sup> Department of Life Safety State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: [59568@i.ua](mailto:59568@i.ua), ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

<sup>3</sup> Department of Physics, National Technical University "Dnipro Polytechnic", 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 46-90-22, e-mail: [bartashevskal.i@gmail.com](mailto:bartashevskal.i@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0205-2245

**Abstract. Purpose.** One of the safety conditions for emergency explosions of gas-air mixtures is the prediction of the consequences of such situations and the adoption of adequate decisions on the localization of destructive factors. One of the main factors affecting the explosion of gas-air mixtures, in conditions of extended structures, is the shock air wave. For the calculation of explosion-proof facilities there is a regulatory framework that is based on experimental data. However, the problem of establishing reliable parameters of the propagation of a shock air wave remains relevant. One of the promising directions in the calculation of tasks of highly unsteady processes is the use of numerical methods. At present, a solution

has been proposed for the propagation of explosive waves in extended channels using the schemes of numerical calculation of the equations of gas dynamics by the modified method of “large” particles. The task takes into account the factor of the fall in the energy of motion of the gas flow due to the involvement in the movement of the air masses increasing with distance and due to the action of the friction forces of the gas flow against the walls. Further development of the mathematical model of the process of propagation of shock air waves occurs by substantiating the methodology for calculating the parameters of their attenuation, taking into account the heat transfer to the channel walls. **Methodology.** Analysis and synthesis of theoretical studies, mathematical modeling of gas-dynamic processes of propagation of explosive air waves in extended structures. The processes of formation and propagation of a shock air wave were investigated by the method of mathematical modeling using the laws and equations of continuum mechanics and mathematical physics. For the numerical solution of differential equations, the method of large particles was used (Davydov method). **Results.** According to the simulation results, the largest relative decrease occurs in the parameter of the specific total energy of the medium – by 5 %, pressure by 3 %, density 2.5 %, decrease in speed 2 %, with the maximum value of the heat exchange coefficient. Moreover, an intensive increase in heat loss occurs in the zone of 3...5 lengths of the gas-air mixture section, then the degree of increase decreases and on the rest of the way it changes insignificantly. If the heat transfer coefficient is reduced by half, the growth zone of the coefficient  $k$  increases to 5–7  $x/L_D$ . **Scientific novelty.** The effects of heat exchange between the air shock wave and the channel walls are investigated, that allows to take into account the balance of dissipation of the total energy of an unsteady gas flow. The regularities of changes in the parameters of the shock air wave, which propagates in extended structure, due to the heat exchange of the gas flow with the wall of the structure are obtained. **Practical relevance.** The possibilities of procedures for predicting the parameters of the propagation of shock air waves have been expanded using a multifactor mathematical model.

**Keywords:** *internal flow; boundary conditions of the 3 kind; shock air wave; numerical calculation; heat flow; internal energy*

**Постановка проблемы, ее связь с научными и практическими заданиями.** Аварийные взрывы газоздушных смесей генерируют множество разрушающих факторов, основными из которых является ударные воздушные волны. Их особенность – свойство затекания в любые объемы и разветвления протяженных каналов и таким образом возможность распространения на значительные расстояния. Безопасность работ персонала при угрозах действия ударной волны обеспечивается защитными конструкциями устанавливаемых на пути ее распространения. На устойчивость таких конструкций, в том числе, влияет достоверность оценки нагрузки создаваемой ударной воздушной волной. Расчеты взрывозащитных конструкций осуществляется на основе нормативной базы, которая была разработана во второй половине двадцатого столетия. Однако, проблема защиты от взрывов газоздушных смесей на промышленных объектах повышенной опасности и проблема минимизации последствий разрушительного действия воздушных ударных волн остаётся актуальной. Подтверждение этого могут быть случаи разрушения взрывозащитных конструкций при взрыве газа в подземных сооружениях и распространения ударной воздушной волны с опасной для человека амплитудой давления в места работы людей,

несмотря на соблюдение всех действующих методик определения безопасных расстояний.

**Анализ последних исследований и публикаций, выделение нерешенной части проблемы.** Действие ударной воздушной волны на взрывозащитные конструкции определяется двумя динамическими характеристиками: избыточным давлением во фронте волны и импульсом силы, который передается взрывозащитной конструкции за время ее действия. Снижение интенсивности ударной волны при ее движении вдоль протяженных галерей происходит за счет вовлечения в движение новых масс атмосферы, расхода энергии на разрушение препятствий, процессов внутреннего вязкого трения и трения газа о стенки выработки, а также за счет потерь энергии при теплообмене со стенками сооружения.

Численные методы решения газодинамических задач нестационарного течения воздуха и продуктов взрыва позволяют выявить закономерности влияния всех факторов на параметры ударной воздушной волны. Для проведения вычислительного эксперимента необходимо решать систему уравнений газовой динамики, кинетики химической реакции окисления метана и других компонентов метанового ряда. Очевидно, что подходы к решению такой задачи, основанные на использовании аналитических решений, могут

использоваться лишь для получения грубых оценочных результатов.

Для проведения вычислительного эксперимента требуется применение устойчивых, консервативных разностных схем, относительно простых в реализации и экономичных с точки зрения затрат вычислительных мощностей компьютеров. В работах [4; 8; 9] предложено решение задачи распространения ударной воздушной волны (УВВ) в подземных сооружениях с помощью схемы численного счета уравнений газовой динамики модифицированным методом Давыдова (крупных частиц). В задаче учитывается фактор падения энергии движения газового потока за счет вовлечения в движение возрастающих с расстоянием воздушных масс и за счет теплообмена потока газа со стенкой сооружения. На данном этапе в решении задачи не учитывалось действие сил трения газового потока в ударной волне со стенкой.

Значительные результаты в этом направлении получены исследования НИИГД «Респиратор». В работе [1; 2; 6] предложено решение задачи распространения УВВ, путем численного решения уравнений газовой динамики разностной схемой. Моделирование диссипации энергии потока производится за счет теплотерь от нагрева вовлекаемых в движение воздушных масс шахтного воздуха.

В совместных работах Томского политехнического института, РосНИИГД и приводится численное решение задач газовой динамики методом С.К. Годунова [5; 7; 11]. Для расчета теплового взаимодействия газового потока со стенками выработки используются математические зависимости механики движения жидкости и газа в каналах.

Применительно к решению задач теплообмена и теплопередач наиболее перспективным является использование программного комплекса ANSYS, пакет FLUENT или CFX, позволяющего провести, в том числе, численный эксперимент для турбулентных течений газа с различными режимами теплопереноса [3; 12]. Однако такая задача будет решена в общем виде, без особенностей, возникающих в условиях горных выработок.

**Цель статьи.** Развитие математической модели процесса распространения ударных воздушных волн в протяженных каналах путем обоснования методики расчета параметров их затухания с учетом теплоотдачи потока в стенки.

**Основной материал.** В работе [8; 9] математическая постановка задачи распространения ударной воздушной волны в сооружении сводится к рассмотрению движения газового потока в цилиндрическом канале с эквивалентным диаметром. Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе «газовая взрывчатая среда – окружающая среда» (рис. 1).

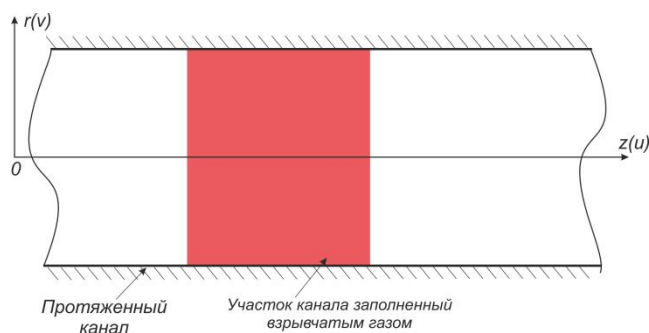


Рис. 1. Схема задачи / Fig. 1. Driving task

Для развитие математической модели распространения ударной воздушной волны по сети каналов и выработок необходимо в уравнениях Эйлера учесть тепловой поток в стенку канала от нагретых газов движущихся за фронтом ударной волны.

Моделирование теплового взаимодействия газового потока со стенками выработки предлагается следующим образом. В правой части уравнения энергии учитывается тепловое взаимодействие газового потока со стенками выработок в форме уравнения теплового баланса, основанное на законе сохранения энергии.

Вследствие конвективных и турбулентных течений газа в возмущенной среде скорость выравнивания температуры по сечению канала намного больше скорости ее изменения за счет теплоотвода в стенки канала. На основании этого, решение уравнений теплового баланса предлагается производить для всего объема газа в целом:

$$qPd z = Q S d z, \quad (1)$$

где  $q$  – плотность потока тепла в стенку, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $Q$  – удельная объемная скорость теплопотерь в газе, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $P$  – периметр канала, м;  $S$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>.

Температурное поле в расчетной области определяется на основании уравнения термодинамики:

$$T = j/C_m, \quad (2)$$

где  $T$  – температура газа, К;  $j$  – удельная внутренняя энергия газа, Дж/кг;  $C_m$  – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К);  $C_m = C_\mu/\mu$ ;  $C_\mu$  – молярная теплоемкость газа, Дж/(моль·К);  $\mu$  – молярная масса воздуха, кг/моль.

Передача тепловой энергии от газа стенке канала, происходит за счет конвективного и кондуктивного теплообмена. Вследствии интенсивного турбулентного перемешивания газов и конвективных потоков происходит выравнивание температуры газов по сечению канала. Таким образом, пристеночные тепловые эффекты можно опустить и уравнения Эйлера, в дивергентном виде, в цилиндрической симметрии можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{W}) &= 0, && \text{неразрывности;} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \\ \text{и} \quad \text{и} &&& \text{движения;} \quad (3) \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\rho E \bar{W}) + \text{div}(PW) &= q\Pi && \text{энергии;} \end{aligned}$$

где  $\rho$  – плотность;  $P$  – давление;  $W$  – скорость;  $u, v$  – компоненты скорости  $W$  по оси  $z$  и  $r$  соответственно;  $z, r$  – цилиндрические координаты;  $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$  – полная энергия;  $q$  – плотность теплового потока в стенку канала, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $\Pi$  – периметр канала, м.

Баланс тепловой энергии в теплообмене со стенкой канала, представленный в правой части уравнения энергии (3) членом  $q\Pi$ , будем учитывать граничными условиями III рода по теплопроводности, которые возможно

применить для данного вида теплообмена [13]:

$$q = \alpha_s (T_s - T) F \Delta t, \quad (4)$$

где  $\alpha_s$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_s$  – температура стенки, К;  $T$  – средняя по сечению канала температура газа, К;  $F$  – площадь на которой происходит теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – время теплообмена, с.

Коэффициент теплообмена (теплоотдачи)  $\alpha_s$ , который по определению является количеством теплоты, распространяющегося через единичную поверхность при единичной разности температур, определяют следующим образом [14]:

$$\alpha_s = \frac{N_u \lambda_n}{D_{\text{экв}}}, \quad (5)$$

где  $N_u$  – число Нуссельта;  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м·К);

$$N_u = 0,22 R_e^{0,5} P_r^{0,47} B, \quad (6)$$

где  $P_r$  – число Прандтля;

$$P_r = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_g}, \quad (7)$$

где  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $c_p$  – изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг·К);  $R_e$  – число Рейнольдса, для цилиндрического канала определяется по формуле [15]:

$$R_e = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2}{k+1}} p \cdot \rho \frac{q D_{\text{экв}}}{\mu}, \quad (8)$$

где  $q$  – приведенный расход газа через расчетную ячейку;  $k$  – показатель адиабаты воздуха,  $k = 1,4$ ;  $D_{\text{экв}}$  – эквивалентный

диаметр канала, м,  $D_{\text{экв}} = \frac{4S}{\Pi}$ ;  $S$  – поперечное сечение канала, м<sup>2</sup>;  $B$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена, определяется по следующей зависимости [15]:

$$\exp\left[\frac{\left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt}}{\left(\frac{l}{\delta}\right)}\right] \cdot \left(\frac{l}{\delta}\right) = 13 \quad (9)$$

где  $l$  – характерное расстояние между выступами шероховатости, м;  $\delta$  – высота выступа, м.

Реализация учета теплопередачи от газового потока в стенку канала в численной схеме будет выглядеть следующим образом:

На Эйлеровом этапе (первый расчетный цикл):

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{i,j}^n &= u_{i,j}^n - \frac{P_{i+0,5,j}^n - P_{i-0,5,j}^n}{\Delta z} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \\ \tilde{v}_{i,j}^n &= v_{i,j}^n - \frac{P_{i,j+0,5}^n - P_{i,j-0,5}^n}{\Delta r} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \\ \tilde{E}_{i,j}^n &= E_{i,j}^n - \left[ \frac{j P_{i,j+0,5}^n v_{i,j-0,5}^n - (j-1) P_{i,j-0,5}^n v_{i,j-0,5}^n}{(j-0,5) \Delta r} + \right. \\ &+ \left. \frac{P_{i+0,5,j}^n u_{i+0,5,j}^n - P_{i-0,5,j}^n u_{i-0,5,j}^n}{\Delta z} \right] \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n} + \\ &+ AL(T_0 - T_{i,j}^n) \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для тестового расчета оценим значения коэффициента теплообмена газового потока, который движется за фронтом ударной волны со стенками канала подземного сооружения. Материалом стенки подземных сооружений, как правило, является кирпич, бетон, железобетон. В подземных выработках, в первом приближении, можно считать стенкой горную породу (песчаные, глинистые сланцы, песчаники).

Согласно формуле (5) определим число Прандтля на единичной длине канала, атмосфера – воздух при средней температуре в потоке 500 °С, коэффициенте теплопроводности 0,0574 Вт/(м·К):

$$Pr_r = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_g} = \frac{2,17 \cdot 10^{-5} \cdot 1,003 \cdot 10^3}{0,0574} = 0,47$$

Для расчета числа Нуссельта нам необходимо знать критерий Рейнольдса в

сверхзвуковом потоке за фронтом ударной волны. Поскольку такие данные для ударных волн отсутствуют, по аналогии можно принять значения числа Рейнольдса в потоках газотурбинных авиационных двигателях. В них данный показатель в номинальных и форсажных режимах изменяется в пределах  $2 \cdot 10^5 \dots 8 \cdot 10^7$  [16].

Так, поправочный коэффициент учитывающий влияние шероховатости определим для условий выработки подземного сооружения закрепленной арочной крепью из спецпрофиля СВП. Расстояние между рамами крепи 1 м, высота выступа 0,2 м. Тогда, согласно (9) отношение:

$$\left(\frac{l}{\delta}\right) = \left(\frac{1}{0,2}\right) = 5 < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} = 13_{opt}$$

соответственно

$$\exp\left[\frac{\left(\frac{l}{\delta}\right)}{\left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt}}\right] = \exp\left[\frac{5}{13}\right] = 1,4$$

Тогда:

$$\begin{aligned} N_u &= 0,22 R_e^{0,5} P_r^{0,47} B = \\ &= 0,22 \cdot (5 \cdot 10^7)^{0,5} \cdot (0,47)^{0,47} \cdot 1,4 = 1524 \end{aligned}$$

Коэффициент теплопроводности для песчаника, который по теплофизическим свойствам близок к строительному бетону и находится близко к значению 2,18 Вт/(м·К).

В итоге, коэффициент теплоотдачи составит:

$$\alpha_s = \frac{N_u \cdot \lambda_n}{D_{экв}} = \frac{1524 \cdot 2,18}{1} = 3323 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Оценим работу численной схемы модифицированного метода крупных частиц учитывающей теплообмен ударной воздушной волны со стенками протяженного канала при изменении коэффициента теплообмена от 0 до 10000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Тестовая задача распад разрыва выполнена для условия расположения источника взрыва в тупиковой части секции высокого давления ударной трубы. Размер секции высокого давления 2 м, секция разгрузки 5 м (рис. 2).

Исходя из результатов численного эксперимента, влияние теплообмена газового потока со стенкой канала не имеет решающую роль в формировании параметров ударных воздушных волн, несмотря на

значительную оценочную величину коэффициента теплообмена порядка  $3\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Это объясняется тем, что время контакта с большими градиентами температур между газом и стенкой находится в субмиллисекундных пределах, что и дает незначительную диссипацию тепловой энергии потока в стенку канала. Так, согласно графиков (рис. 2–5) основные параметры в ближней зоне за счет теплоотдачи снижаются не более чем на 1–5 %. Однако, существует двойная взаимосвязь степени снижения энергии ударной воздушной волны: с одной стороны, в ближней зоне при ограниченном времени с момента начала взрыва существует значительный градиент температур. Далее, по мере накопления времени контакта градиент температур снижается.

Для установления распределения коэффициента снижения энергии ударной воздушной волны в зонах ее распространения, за счет теплопотерь, нами был проведен численный эксперимент в условиях распространения волны на расстоянии до 300 м. Начальные условия: давление взрыва  $P_n = 1\ \text{МПа}$ , длина секции детонации  $L_D = 2\ \text{м}$ , диаметр канала  $d_k = 1\ \text{м}$ , начальная плотность продуктов взрыва  $\rho_{ПД} = 1,1\ \text{кг}/\text{м}^3$ . В секции разгрузки физические параметры среды приняты для характеристик воздуха.

Коэффициент снижения параметров  $k_s$  ударной волны ( $P, u, \rho, E$ ) определяется как отношение:

$$k_s = 1 - \frac{f_p}{f}, \quad (12)$$

где  $f_p, f$  – амплитуда параметра во фронте ударной волны с учетом и без учета теплопотерь.

Результаты моделирования приведены на рисунке 6.

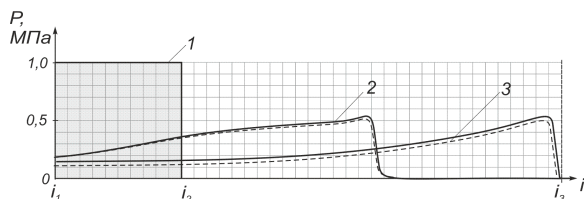


Рис. 2. Результат численного моделирования влияния теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – давление в момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия  $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , штриховая линия –  $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  / Fig. 2. The results of numerical

simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – pressure at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line  $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , dashed line –  $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

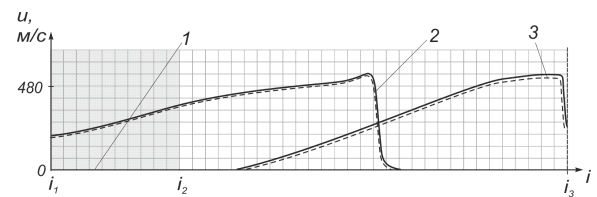


Рис. 3. Результат численного моделирования влияния теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – скорость газового потока на момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия  $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , штриховая линия –  $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  / Fig. 3. The results of numerical simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – velocity at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line  $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , dashed line –  $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

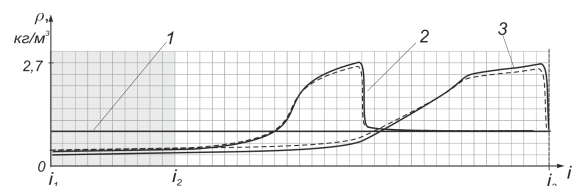


Рис. 4. Результаты численного моделирования влияние теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – плотность газового потока на момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия  $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , штриховая линия –  $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  / Fig. 4. The results of numerical simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – gas flow density at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line  $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , dashed line –  $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

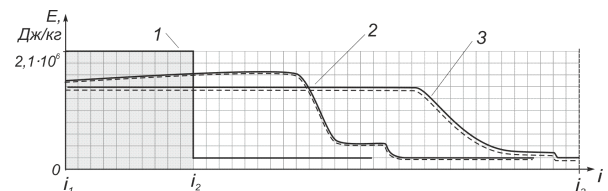


Рис. 5. Результаты численного моделирования влияние теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – удельная полная энергия газового потока на момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия  $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , штриховая линия –  $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  / Fig. 5. The results of numerical simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – specific energy flow of gas at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line  $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , dashed line –  $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Согласно результатам моделирования наибольшее относительное снижение происходит по параметру удельной полной энергии среды – на 5 %, давление на 3 %, плотность 2,5 %, падение скорости 2 %, при максимальном значении коэффициента теплообмена. Причем интенсивное нарастание теплопотерь происходит в зоне 3...5 длин участка газозвушной смеси,



далее степень нарастания снижается и на всем остальном пути изменяется незначительно. При уменьшении коэффициента теплообмена вдвое зона нарастания коэффициента  $k_s$  увеличивается до  $5 \dots 7 x/L_D$ .

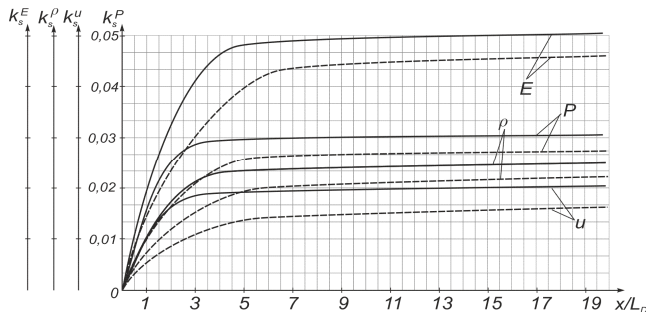


Рис. 6. Зависимость коэффициента снижения амплитуды параметров ударной воздушной волны от расстояния до эпицентра взрыва: сплошная линия  $\alpha = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , штриховая линия –

$\alpha = 10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  / Fig. 6. Dependence of the coefficient of reduction of the amplitude of the parameters of a shock air wave from the distance to the explosion epicenter: solid line  $\alpha = 5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , dashed line –  $\alpha = 10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

**Выводы.** Таким образом, полученные путем численного моделирования коэффициенты снижения параметров  $k_s$  за счет теплотерь в ближней зоне (до  $10 x/L_D$ ), в зависимости от размеров участка газоздушнoй смеси, можно аппроксимировать на весь путь распространения ударной воздушной волны. Это дает возможность уменьшить объемы вычислений для прогнозирования расстояний и зон поражения ударной воздушной волной при аварийных взрывах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев В. Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана / В. Г. Агеев. // Горноспасательное дело. – 2010. – Вып. 47. – С. 5–10.
2. Агеев В. Г. Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакциях горения метана и пыли в горных выработках / В. Г. Агеев, И. Н. Зинченко // Форум гірників–2012 : матер. міжнар. конф., (3–6 жовтня 2012 р.). – Дніпропетровськ : НГУ, 2012. – С. 12–16.
3. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent : учеб. пособие / [О. В. Батурич, Н. В. Батурич, В. Н. Матвеев]. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151 с.
4. Метод крупных частиц в газовой динамике : монография / [О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов]. – Москва : Наука, 1982. – 391 с.
5. Васенин И. М. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И. М. Васенин, Э. Р. Шрагер, А. Ю. Крайнов, Д. Ю. Палеев // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 155–163.
6. Греков С. П. Методика расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли в шахтах / С. П. Греков, И. Н. Зинченко, В. С. Карманов // Горноспасательное дело. – 2010. – Вып. 47. – С. 17–25.
7. Лукашов О. Ю. О комплексном подходе к моделированию аварийной ситуации при взрыве газа в угольной шахте / О. Ю. Лукашов // Вестник Томского государственного университета. – 2014. – № 6(32). – С. 86–93.
8. Налісько Н. Н. Численный расчет динамической нагрузки от воздействия воздушных ударных волн на инженерные сооружения / Н. Н. Налісько // Высокоэнергетические системы, процессы и их модели. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2013. – С. 255–266.
9. Налісько Н. Н. Взаимодействие ударных воздушных волн со стенками горных выработок / Н. Н. Налісько // Горноспасательное дело. – 2014. – Вып. 51. – С. 43–57.
10. Справочник по теплообменникам : в 2-х т., Т. 2 / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
11. Чжан Ц. Оценки опасности взрывов смесей метана с воздухом в шахтах / Ц. Чжан, В. Ли, Б. Цинь, Ю. Дуань // Физика горения и взрыва. – 2010. – № 6. – С. 66–72.
12. ANSYS для инженеров : справ. пособие / [А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А.Ф. Смалюк]. – Москва : Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
13. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое : монография / [С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев]. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
14. Численные методы теории конвективного тепломассообмена : монография / [В. Ю. Безуглый, Н. М. Беляев]. – Киев–Донецк : Вища школа, 1984. – 176 с.
15. Беляев Н. М. Нестационарный теплообмен в трубах : монография / Н. М. Беляев. – Киев–Донецк : Вища школа, 1980. – 216 с.
16. Виноградов Л. В. Исследования влияния числа Рейнольдса на характеристики радиального вентилятора / Л. В. Виноградов, И. В. Евтеев, М. Талавера // Вестник РУДН. Инженерные исследования. – 2000. – № 3. – С. 50–52.

## REFERENCES

1. Ageev V.G. *Matematicheskaya model formirovaniya udarnykh voln v gornykh vyirabotkakh pri vzryivakh metana* [The mathematical model of the shock wave formation in the mines by the methane explosions]. *Gornospasatelnoe delo* [The mine rescue work]. 2010, issue 47, pp. 5–10. (in Russian).
2. Ageev V.G. and Zinchenko I.N. *Modelirovanie rasprostraneniya udarnykh voln pri mgnovennoy i tsepnoy reaktsiyah gorennya metana i pyili v gornykh vyirabotkakh* [Modeling of shock waves propagation at momentary and chain reaction of methane and dust combustion in mine working]. *Forum hirnykiv – 2012 : materialy mizhnarodnoi konferentsii* [Miners forum – 2012 : materials of the international conference]. 3–6 of October 2012, Dnipropetrovsk : National Mine University Publ., 2012, pp. 12–16. (in Russian).
3. Baturin O.V., Baturin N.V. and Matveev V.N. *Raschet techeniy zhidkostey i gazov s pomoschy universalnogo programmynogo kompleksa Fluent. Ucheb. posobie* [Calculation of flows of liquids and gases by means of a universal software package Fluent. Tutorial]. Samara : Samarskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskiy universitet, 2009, 151 p. (in Russian).
4. Belotserkovskiy O.M. and Davydov J.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike* [The large particles method in the gas dynamics]. Moscow : Nauka Publ., 1982, 391 p. (in Russian).
5. Vasenin I.M., Schragar E.R., Krajnov A.J. and Paleev D.J. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov ventilyatsii seti vyirabotok ugolnoy shahty* [The mathematical modeling of the non-stationary ventilation processes in the coal mines workings network]. *Kompyuternyye issledovaniya i modelirovanie* [The computer studies and modeling]. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 155–163. (in Russian).
6. Grekov S.P., Zinchenko I.N. and Karmanov V.S. *Metodika rascheta parametrov vozdukhnykh udarnykh voln pri vzryivakh gaza i pyili v shahtah* [The calculation methodology of the of air shock waves parameters by the gas and dust explosions in mines]. *Gornospasatelnoe delo* [The mine rescue work]. 2010, issue 47, pp. 17–25. (in Russian).
7. Lukashov O.Yu. *O kompleksnom podhode k modelirovaniyu avariynoy situatsii pri vzryive gaza v ugolnoy shahte* [About the complex approach to the modeling the emergency situation by the gas explosion in a coal mine]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University]. 2014, no. 6(32), pp. 86–93. (in Russian).
8. Nalisko N.N. *Chislennyiy raschet dinamicheskoy nagruzki ot vozdeystviya vozdukhnykh udarnykh voln na inzhenernyye sooruzheniya* [The numerical account of the dynamic load from the air shock wave effect on the engineering buildings]. *Vysokoenergeticheskie sistemy, protsessy i ih modeli* [High-energy systems, processes and their models]. Dnepropetrovsk : National Mine University, 2013, pp. 255–266. (in Russian).
9. Nalisko N.N. *Vzaimodeystvie udarnykh vozdukhnykh voln so stenkami gornykh vyirabotok* [Interaction of shock air waves with walls of mine excavation]. *Gornospasatelnoe delo* [Mine rescue work]. 2014, issue 51, pp. 43–57. (in Russian).
10. Reference book on heat exchangers : in 2 vol. Vol. 2. Transl. from English under red. Martynenko O.G. and others. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1987, 352 p. (in Russian).
11. Zhang C., Lee V., Cin B. and Duan J. *Otsenki opasnosti vzryivov smesey metana s vozduhom v shahtah* [The danger estimation of the methane and air mixture explosions in mines]. *Fizika gorennya i vzryiva* [The combustion and explosion physics]. 2010, no. 6, pp. 66–72. (in Russian).
12. Chigarev A.V., Kravchuk A.S. and Smalyuk A.F. *ANSYS dlya inzhenerov : sprav. posobie* [ANSYS for Engineers : Reference tutorial]. Moscow : Mechanical engineering-1 Publ., 2004, 512 p. (in Russian).
13. Kutateladze S.S. and Leontev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogrannom sloe* [Heat and mass transfer and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow : Energoatomizdat, 1985, 320 p. (in Russian).
14. Bezuglyiy V.Yu. and Belyaev N.M. *Chislennyye metody teorii konvektivnogo teploobmena* [Numerical methods of the theory of convective heat and mass transfer]. Kyiv–Donetsk : Vyscha shkola, 1984, 176 p. (in Russian).
15. Belyaev N.M. *Nestatsionarnyy teploobmen v trubah* [Unsteady heat transfer in pipes]. Kyiv–Donetsk : Vyscha shkola, 1980, 216 p. (in Russian).
16. Vinogradov L.V., Evteev I.V. and Talavera M. *Issledovaniya vliyaniya chisla Reynoldsa na harakteristiki radialnogo ventilyatora* [Studies on the effect of Reynolds number on the characteristics of a radial fan]. *Vesnik RUDN. Inzhenernyye issledovaniya* [Bulletin of RUDN. Engineering research]. No. 3, 2000, pp. 50–52. (in Russian).

Надійшла до редакції: 24.12.2018 р.

УДК 69.059.7

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.19.402

## РОЗВИТОК БУДІВЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ З УРАХУВАННЯМ ЗАВДАНЬ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ ДЕГРАДОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

КОВАЛЬОВ В. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
БРОНЕВИЦЬКИЙ С. П.<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
ПРОТАСОВА Є. В.<sup>3</sup>, канд. екон. наук, доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 906-86-42, e-mail: [kovvyach12@gmail.com](mailto:kovvyach12@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

<sup>2</sup> Комунальна організація «Інститут Генерального плану м. Києва», вул. Хрещатик, 32, 01001, Київ, Україна, тел. +38 (044) 234-85-89, e-mail: [bsp@grad.gov.ua](mailto:bsp@grad.gov.ua), ORCID ID: 0000-0002-7585-0638

<sup>3</sup> Кафедра планування та організації виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 561-14-03, e-mail: [lizvak81@gmail.com](mailto:lizvak81@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7723-2000

**Анотація. Постановка проблеми.** Зважаючи на тенденцію зростання чисельності міського населення відносно сільського, необхідність забезпечення сталого розвитку міст в існуючих межах, структуру і обсяги існуючого житлового фонду, високий рівень його фізичного зносу, попит на нове житло, ціни на житлову нерухомість, обмежені можливості державного бюджету, соціальну диференціацію населення та інвестиційні можливості придбання житла населенням, актуальною постає проблема формування фонду доступного і соціального житла, зокрема, за рахунок нового будівництва та реконструкції деградованих об'єктів. При цьому відсутнє вичерпне наукове обґрунтування прогнозованих вартості і тривалості будівництва доступного житла, яке б ураховувало містоформувні особливості територій великих міст та комплексний вплив організаційно-технологічних і економічних факторів. **Мета статті** - визначення проблем і перспективних напрямів розвитку будівельного комплексу виходячи з необхідності забезпечення сталого розвитку міст, зокрема, шляхом реконструкції та ревіталізації деградованих об'єктів. **Висновок.** Пріоритетні напрямки вирішення проблеми перспективного розвитку районів застарілої забудови такі: комплексне вирішення проблеми застарілого житлового фонду міста; отримання додаткової житлової площі за рахунок знесення застарілого житлового фонду та будівництва на його місці сучасних багатоповерхових будинків; ефективне та раціональне використання міських територій, у тому числі промислових. При цьому необхідно виходити з прогнозних структури і обсягів нового житлового будівництва та можливостей розміщення об'єктів доступного житла в існуючих межах міст. Крім того, розвиток будівництва доступного житла передбачає наявність таких основних чинників як пільгове кредитування та забезпечення забудовників сприятливими умовами.

**Ключові слова:** реконструкція; ревіталізація; будівельний комплекс; організація будівництва; доступне житло

## РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ ЗАДАЧ РЕВИТАЛИЗАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

КОВАЛЕВ В. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
БРОНЕВИЦЬКИЙ С. П.<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
ПРОТАСОВА Е. В.<sup>3</sup>, канд. екон. наук, доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (068) 906-86-42, e-mail: [kovvyach12@gmail.com](mailto:kovvyach12@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

<sup>2</sup> Коммунальная организация «Институт Генерального плана г. Киева», ул. Крещатик, 32, 01001, Киев, Украина, тел. +38 (044) 234-85-89, e-mail: [bsp@grad.gov.ua](mailto:bsp@grad.gov.ua), ORCID ID: 0000-0002-7585-0638

<sup>3</sup> Кафедра планирования и организации производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49005, Днiпро, Украина, тел. +38 (067) 561-14-03, e-mail: [lizvak81@gmail.com](mailto:lizvak81@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7723-2000

**Аннотация. Постановка проблемы.** Учитывая тенденцию роста численности городского населения по отношению к сельскому, необходимость обеспечения устойчивого развития городов в существующих границах, структуру и объемы существующего жилищного фонда, высокий уровень его физического износа, спрос на новое жилье, цены на жилую недвижимость, ограниченные возможности государственного бюджета, социальную дифференциацию населения и инвестиционные возможности приобретения жилья населением, актуальной является проблема формирования фонда доступного и социального жилья, в том

числе за счет нового строительства и реконструкции деградированных объектов. При этом отсутствует исчерпывающее научное обоснование прогнозируемых стоимости и продолжительности строительства доступного жилья, учитывающее градостроительные особенности территорий крупных городов и комплексное влияние организационно-технологических и экономических факторов. **Цель статьи.** определение проблем и перспективных направлений развития строительного комплекса, исходя из необходимости обеспечения устойчивого развития городов, в частности, путем реконструкции и ревитализации деградированных объектов. **Вывод.** Приоритетными направлениями решения проблемы перспективного развития районов устаревшей застройки являются: комплексное решение проблемы устаревшего жилищного фонда города; получение дополнительной жилой площади за счет сноса устаревшего жилого фонда и строительства на его месте современных многоэтажных домов; эффективное и рациональное использование городских территорий, в том числе промышленных. При этом необходимо исходить из з прогнозируемых структуры и объемов нового жилищного строительства и возможностей размещения объектов доступного жилья в существующих границах городов. Кроме того, развитие строительства доступного жилья предполагает наличие таких основных факторов как льготное кредитование и обеспечение застройщиков благоприятными условиями.

**Ключевые слова:** реконструкция; ревитализация; строительный комплекс; организация строительства; доступное жилье

## DEVELOPMENT OF A BUILDING COMPLEX TAKING INTO ACCOUNT THE TASKS OF REVITALIZATION AND RECONSTRUCTION OF DEGRADED OBJECTS

KOVALOV V.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
BRONEVYTSKYI S.P.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.)*,  
PROTASOVA Ye.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Econ.), Ass. Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of bases and foundations, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (068) 906-86-42, e-mail: [kovvyach12@gmail.com](mailto:kovvyach12@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

<sup>2</sup> Municipal organization “Institute of General Plan of Kyiv”, 32, Khreshchatyk str., Kyiv 01001, Ukraine, tel. +38 (044) 234-85-89, e-mail: [bsp@grad.gov.ua](mailto:bsp@grad.gov.ua), ORCID ID: 0000-0002-7585-0638

<sup>3</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (067) 561-14-03, e-mail: [lizvak81@gmail.com](mailto:lizvak81@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7723-2000

**Abstract. Problem statement.** Considering the growth trend of the urban population in relation to the rural one, the need to ensure sustainable urban development within existing boundaries, the structure and volume of the existing housing stock, a high level of physical deterioration, demand for new housing, prices for residential real estate, limited state budget opportunities, social differentiation of the population and investment opportunities for housing acquisition by the population; the actual problem is the formation of an affordable and social fund about housing at the expense of new construction and reconstruction of degraded objects. At the same time, there is no comprehensive scientific substantiation of the predicted cost and duration of the construction of affordable housing, taking into account the town-forming features of the territories of cities and the complex influence of organizational, technological and economic factors. **Purpose of the article.** Identification of problems and future directions for the development of the construction complex, based on the need to ensure sustainable urban development, in particular through the reconstruction and revitalization of degraded facilities. **Conclusion.** The priority directions for solving the problem of the future development of obsolete development areas are a comprehensive solution to the problem of the obsolete housing stock of the city; obtaining additional living space due to the demolition of obsolete housing and the construction in its place of modern high-rise buildings; rational and efficient use of urban areas, including industrial ones. At the same time, it is necessary to proceed from the predicted structure and volume of new housing construction and the possibilities of locating affordable housing in the existing borders of cities. In addition, the development of affordable housing implies the existence of such major factors as preferential loans and the provision of favorable conditions for developers.

**Keywords:** reconstruction; revitalization; building complex; organization of construction; affordable housing

### **Постановка проблеми.**

Оцінка сучасних тенденцій свідчить про пріоритетність компактного розвитку великих міст у XXI столітті, що зумовлено об'єктивними факторами. До найбільш вагомих належать: висока вартість земельних ділянок; необхідність економії енергоресурсів та спричинені цим тенденції до зменшення протяжності інженерних мереж, дорожньо-транспортної мережі; наявність значних територій в межах міст, зайнятих застарілою забудовою.

До числа спільних для більшості великих міст України, таких як Київ, Харків, Одеса, Дніпро, Запоріжжя, Львів, проблем їх розвитку належать:

житлова проблема, зумовлена збільшенням постійного населення і необхідністю розміщення додаткових обсягів житлового будівництва в існуючих межах міст;

забезпеченість об'єктами соціальної інфраструктури відстає від нормативних вимог, особливо у районах, віддалених від центру міста;

інтенсивне зростання кількості автомобілів;

зростання диспропорцій між місцями розселення та місцями докладання праці, що спричиняє загострення транспортних проблем;

значне збільшення потреб електропостачання та теплопостачання для існуючої та перспективної забудови;

надмірна концентрація офісних приміщень у центральній частині міст, спотворення традиційного характеру історичної забудови та знецінення пам'яток культурної спадщини у центральній частині міст;

відставання дорожньо-транспортного будівництва та інженерного забезпечення від існуючих потреб [1; 4; 7; 12; 13; 15; 17; 18].

На разі міста України значно відстають від європейських міст за житловою забезпеченістю та іншими показниками комфортності життя населення.

Зважаючи на тенденцію зростання чисельності міського населення відносно сільського, необхідність забезпечення

сталого розвитку міст в існуючих межах, структуру і обсяги існуючого житлового фонду, високий рівень його фізичного зносу, попит на нове житло, ціни на житлову нерухомість, обмежені можливості державного бюджету, соціальну диференціацію населення та інвестиційні можливості придбання житла населенням [7; 13], актуальною постає проблема формування фонду доступного і соціального житла, зокрема, за рахунок нового будівництва та реконструкції деградованих об'єктів.

Доступність житла визначається, перш за все, вартістю його будівництва, яка, у свою чергу, зумовлена економічністю, а саме: економічністю архітектурно-технічних рішень, економічністю процесу спорудження будівлі, економічністю в процесі експлуатації (експлуатаційні витрати), вартістю зносу і вартістю відтворення (заміщення) будівлі. При цьому відсутнє вичерпне наукове обґрунтування прогнозованих вартості і тривалості будівництва доступного житла, яке б урахувало містоформівні особливості територій великих міст та комплексний вплив організаційно-технологічних і економічних факторів.

**Аналіз публікацій.** Проблемі формування, оцінювання, аналізу, обґрунтування і вибору раціональних ресурсозберігальних організаційно-технологічних рішень спорудження цивільних будівель присвячено наукові праці Є.Ю. Антипенка, А.І. Білоконя, Д. Ф. Гончаренка, О. А. Гусакова, В. І. Доненка, Е. К. Завадскаса, В. М. Кірноса, О. І. Менейлюка, П. П. Олійника, В. І. Торкатюка, О. М. Пшінька, О. А. Тугая, І. В. Шумакова, В. Т. Шаленного, Л. М. Шутенка та інших учених [7; 16].

Завданню забезпечення надійності та безпечної експлуатації існуючого житлового фонду присвячено дослідження В. І. Большакова, А. Д. Єсипенко, В. Р. Млодецького, О. Ф. Осипова, А. В. Радкевича, В. В. Савйовського, С. В. Шатова М. В. Савицького та інших дослідників [7; 9].

Питанню підвищення інвестиційної привабливості житлового будівництва присвячено дослідження В. Т. Вечерова, І. Л. Київського, В. О. Поколенка, Р. Б. Тяна та ін. [5; 6; 13].

Результати аналізу наукових праць провідних учених і спеціалістів у галузі проектування, будівництва та експлуатації міського житлового фонду дозволили зробити висновок про відсутність вичерпного наукового обґрунтування прогнозованих техніко-економічних показників проектів будівництва доступного житла, а також формування фонду доступного житла за рахунок ревіталізації промислових будівель, заснованого на врахуванні містоформівних особливостей територій великих міст і комплексного впливу визначальних організаційно-технологічних та економічних факторів.

**Мета статті** - визначення проблем і перспективних напрямів розвитку будівельного комплексу виходячи з необхідності забезпечення сталого розвитку міст, зокрема, шляхом реконструкції та ревіталізації деградованих об'єктів.

**Результати досліджень.** Великі міста України в сучасних соціально-економічних умовах - це не лише центри промислового виробництва, науки, культури, освіти, а й

головні опорні пункти формування системи розселення.

Серед 10 мегаполісів (рис. 1) України, згідно з класифікацією міських поселень за кількістю населення [10], до групи найбільших міст із населенням понад 800 тис. чол. належать: Київ, Харків, Одеса, Дніпро; до групи великих міст із населенням понад 500 тис. чол. до 800 тис. чол. - Запоріжжя, Львів, Кривий Ріг Дніпропетровської обл.; до групи великих міст із населенням понад 250 тис. чол. до 500 тис. чол. можна віднести: Миколаїв, та Маріуполь [14].

На разі Київ, Харків, Дніпро, Одеса, Львів – центри макрорегіонів-серйозно відстають від європейських міст за рівнем зайнятості та зарплат, продуктивності праці, за житловою забезпеченістю та іншими показниками комфортності життя населення [1; 2].

Вирішальну роль у розробленні та реалізації довгострокових прогнозів розвитку великих міст відіграють територіальні чинники. Їх оцінка дозволяє обґрунтувати найбільш доцільні види використання територій та їх соціально-економічного розвитку, можливі перепони на цьому шляху, виявлення та взаємоузгодження інтересів влади, бізнесу та громадян.

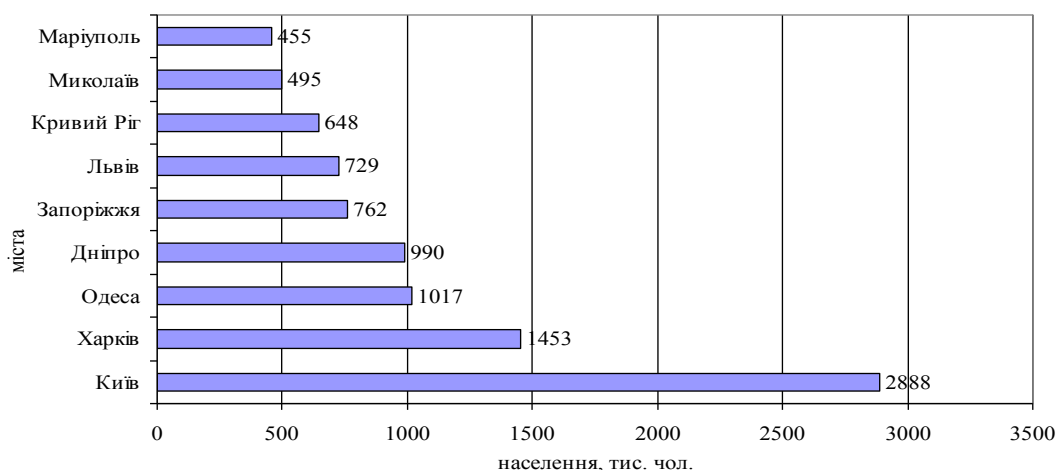


Рис. 1. Розподіл міст України за чисельністю наявного населення, тис. чол. / Fig. 1. Distribution of Ukrainian cities by the number of available population, ths. people

У прийнятому в 2008 р. Радою Європи Маніфесті нової урбаністики зазначено, що для контролю за розвитком міст необхідний

посилений контроль за використанням їх землі [3]. У Європейському Союзі визнається, що за взаємодії галузевих і

територіальних факторів розвитку пріоритет віддається другому. В США стверджується, що без управління використанням земель неможливий місцевий розвиток, що таке управління дозволяє не тільки уникнути втрат, а й спрямувати розвиток у правильне русло.

Цей фактор особливо значущий для великих міст України, де спостерігається гострий дефіцит вільних від забудови територій, а потреба в них і вартість набагато перевищують середні по країні показники.

На шляху розвитку міст із 2002 р. виникли нові містобудівні фактори та проблеми, до основних із яких можна віднести:

- необхідність розміщення додаткових обсягів житлового будівництва в існуючих межах міста, оскільки освоєння суміжних територій стало практично неможливим;
- збільшення постійного населення;
- інтенсивне зростання автомобілізації [1; 2; 12].

Недостатньо вирішено проблему забезпечення населення доступним і соціальним житлом. Необхідно визначити території для створення житлово-громадських комплексів соціального та доступного житла. Стратегічною помилкою було розміщення нових житлових масивів, в основному, на землях області, поширення вибіркової забудови та практики ущільнення житлових дворів. При цьому не здійснювалася реконструкція мікрорайонів індустріальної житлової забудови 60-70-х років минулого століття, де проживає більшість містян. Така житлова політика викликає негативну реакцію та соціальні конфлікти.

Мають місце значне відставання розвитку магістральної вулично-дорожньої мережі, мостів через р. Дніпро, нестача місць паркування легкових автомобілів.

Заходи з розвитку інженерної інфраструктури міста мають суттєві недоліки. Прогнозовані щорічні обсяги твердих побутових відходів уже перевищені.

Це призвело до катастрофічних проблем їх вивезення та переробки.

Занижені потреби в електро- і теплопостачанні не забезпечують навіть існуючої забудови. І навпаки, розрахункове завищення водоспоживання спричинило застій і погіршення якості води.

Внаслідок помилкової планувальної моделі та хибної територіальної політики під час інвестиційно-будівельного буму 2002-2008 рр. були прийняті рішення з розміщення житлових будинків за рахунок частини парків, скверів та інших озелених територій. Застарілість і недосконалість тогочасного законодавства та нормативної бази не враховували нові тенденції розвитку міст і зумовили хибність прогнозів.

Зазначені проблеми та фактори викликали диспропорції містобудівного розвитку, погіршення умов життєдіяльності, транспортного й соціального обслуговування населення.

Прийняття в 2011 р. Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [11] та оновлена відповідно до нього нормативно-правова база одночасно з виявленими проблемами розвитку міста обґрунтовують необхідність підвищення ефективності організації й управління процесом формування міського житлового фонду шляхом розроблення методологічних принципів обґрунтування організаційно-технологічних рішень створення об'єктів доступного житла, зокрема, шляхом ревіталізації промислових будівель, з урахуванням містоформівних особливостей територій великих міст та комплексного впливу визначальних організаційно-технологічних і економічних факторів.

При цьому новими ключовими принципами розвитку великих міст мають стати такі:

- збалансований розвиток міста та агломерації (координоване регулювання використання і забудови приміських територій, формування єдиного транспортно-планувального каркаса міста та приміської зони, розвиток швидкісного електротранспорту для сполучень місць розселення і прикладання праці міста і

- приміської зони, забезпечення будівництва об'єктів спільних інтересів);
- компактне місто (стримування територіального розростання міста для зменшення навантажень та витрат на інженерно-транспортну інфраструктуру, пріоритет внутрішнього розвитку та облаштування міста, раціональне використання вільних міських земельних ресурсів, модернізація застарілого житлового фонду, оновлення деградованих промислово-складських та інших територій);
- привабливе та гуманне місто (підвищення якості житлових умов до рівня європейських міст, урахування потреб у житлі наступного покоління, можливість придбання житла для сімей із середнім рівнем доходу, забезпечення соціального житла для громадян, що потребують соціальної підтримки, гарантування суспільної безпеки та надання якісних побутових і комунальних послуг, розвиток інфраструктури спорту і фізкультури, врахування потреб людей з обмеженими фізичними можливостями);
- мобільне і доступне місто (збалансоване розселення та зайнятість на лівобережній та правобережній частинах, пріоритетний розвиток громадського швидкісного електротранспорту, поліпшення транспортних зв'язків між окремими районами, збільшення протяжності та щільності автомагістралей, будівництво тунелів, мостів, розв'язок та паркінгів, забезпечення зручних транспортних зв'язків із приміськими територіями, зменшення витрат часу до 30-40 хв на пересування від місця проживання до роботи);
- культурно-діловий центр країни (великі ділові ініціативи, активізація потенціалу розвитку міста, розширення міжнародних зв'язків і проєктів, збільшення конкурентоспроможності економіки, розвиток економіки знань, поліпшення інвестиційного клімату, розвиток установ культури з урахуванням потреб різних соціальних та вікових груп, людей з особливими потребами, збільшення

кількості установ дитячого дошкільного та позашкільного виховання, місць культурного спілкування для молоді);

- відповідальність перед прийдешніми поколіннями (збереження історичного середовища, пам'яток світового, національного та місцевого значення, раціональне їх використання для історико-пізнавального туризму, збереження та поліпшення унікального природного ландшафту, рівня озелененості, збагачення екосистем, створення нових зелених насаджень, парків, скверів, збільшення площ громадських зелених зон, поліпшення якості повітря і води та санітарного очищення міста, чистота територій) [1; 2; 5; 13].

Ці принципи реалізуються шляхом постійної та координованої містобудівної діяльності на державному, регіональному і місцевому рівнях, а саме:

відновлення застарілого житлового фонду. Наявний житловий фонд міста потребує суттєвого оновлення. Реконструкція будівель, строк експлуатації яких давно вичерпаний, забезпечить місту суттєве збільшення кількості житла та створення затишних мікрорайонів;

відповідальність за належний вигляд приватної нерухомості. Відповідальність власників реконструйованих будинків за збереження зовнішніх фасадів. Окрім загального дбайливого ставлення до будинку, власники нерухомого майна мають утриматись від дій, які змінюють зовнішність будинку;

враховуючи стан житлово-комунального господарства, суттєві проблеми галузі, а також рівень витрат місцевих бюджетів, які пов'язані з наданням житлово-комунальних послуг населенню, та обмежені ресурси місцевих бюджетів, уряду має підтримувати фінансування районних програм із реконструкції будівель;

оновлення виснаженої житлово-комунальної інфраструктури, реформа житлово-комунального господарства. Розвиток інженерної інфраструктури має здійснюватись шляхом її значної



модернізації. Сьогодні мережі дуже зношені, неприпустимо високий рівень втрат при транспортуванні. Монопольні власники комунікацій у містах не виконують належним чином свої обов'язки щодо утримання та модернізації інженерної інфраструктури. Муніципальна влада через втрату контрольних пакетів акцій таких підприємств може лише спонукати їх до модернізації та змушена щороку передбачати бюджетні видатки на компенсацію різниці в тарифах за отримані мешканцями міста комунальні послуги.

Для належного утримання житлових будинків і прилеглих до них територій необхідно застосувати найкращий світовий досвід. Головна ідея полягає в комплексному ремонті і обслуговуванні будинків і дворів. Здійснення благоустрою має відбуватися після попереднього обстеження та ремонту комунікацій. Благоустрій дворів має бути комплексним.

Формування житлової політики в місті необхідно проводити з урахуванням:

показників якості життя містян та виразного майнового розшарування;

рівня платоспроможності більшості містян;

раціональної потреби переважної більшості громадян у житлі економ-класу;

потреби в соціальному житлі, яке перебуває в комунальній власності та здається в оренду представникам соціально-вразливих верств;

необхідності реконструкції та заміни технічно застарілого житлового фонду;

забезпечення потреб людей з обмеженими можливостями;

продовження заходів з утеплення будинків.

Житлові проблеми для міста найбільш актуальні, особливо гострі вони для населення з низьким та середнім рівнем доходів, які не в змозі утримувати свій існуючий житловий фонд на належному рівні, не можуть поліпшити свої житлові умови.

Через низьку платоспроможність лише 5...8 % країни населення спроможне забезпечити себе власним житлом. Щоб

досягти середньоєвропейського показника забезпеченості житлом на одну людину – 30 м<sup>2</sup>, з урахуванням теперішніх щорічних обсягів будівництва, Україні знадобиться приблизно 60 років. Відповідно до міжнародних норм, річний обсяг будівництва повинен складати 1 м<sup>2</sup> на людину. Натомість останніми роками в Україні на одну людину будується 0,13...0,2 м<sup>2</sup>, що значно поступається навіть пострадянським країнам, не кажучи про країни Європейського Союзу, США та Китай.

Проблему становить відсутність достатніх за розміром вільних земельних ділянок для комплексної забудови в місті.

Важливим завданням сталого розвитку міста в найближчі 5...10 років постає пом'якшення дисбалансу між місцями розселення і місцями докладання праці та наявністю необхідних культурно-побутових об'єктів. Це зменшить значне навантаження на транспортні, екологічні, соціальні сфери життєдіяльності міста.

Будівельні перетворення в центральних районах міст повинні сприяти уповільненню процесів вибуття населення, житлового фонду. Вибуття житлового фонду під час переведення його в нежитловий необхідно компенсувати новим житловим будівництвом або реконструкцією, аби центральне ядро міста не перетворилось в «сіті» деяких сучасних міст розвинутих країн світу, де у вихідні дні, на вечірні часи ці райони «вимирають».

Реконструкція в районах забудови 1960-1970 років та промислової забудови зі зміною її функціонального призначення та збільшення житлової забезпеченості дозволить зменшити чисельність проживаючих у цій забудові на 55...60 тис. чоловік.

Висока вартість землі, недосконалість будівельних норм та їх недотримання викладають порушення комплексності забудови мікрорайонів. Замовники не вводять об'єкти соціальної інфраструктури, перевищують щільність забудови. Точкова забудова окремих житлових споруд в існуючих мікрорайонах без утворення

додаткової соціальної інфраструктури спричинює переваження уже існуючої мережі, порушуються норми інсоляції, зменшується внутрішньодворова зелень, знищуються дитячі, спортивні майданчики тощо.

Останніми роками відчувається гостра потреба в дитячих дошкільних закладах, спортивних спорудах, невеличких магазинах продовольчих товарів у кожному мікрорайоні. В центральному ядрі міста відчувається гостра нестача продовольчих магазинів із невеликим радіусом доступності, існуюча мережа продовольчих магазинів не витримала конкуренції з боку більш прибуткового фінансового бізнесу, брендовими торговими закладами, фінансовими установами, юридичними, страховими конторами тощо.

Комплексного вирішення потребують такі проблеми:

- підвищення рівня житлової забезпеченості (насамперед соціально вразливих верств та «середнього класу») та якості житлового фонду, збільшення обсягів, здешевлення будівництва та поліпшення експлуатаційних якостей доступного та соціального житла;
- завершення недобудованих об'єктів, скорочення термінів будівництва, усунення можливості «будівельних афер»;
- розвиток та поліпшення техніко-технологічних і санітарно-гігієнічних характеристик інженерних мереж та санітарного очищення;
- удосконалення архітектурно-планувальної структури забудови, ревіталізація індустріальних зон та інших занедбаних територій міст;
- упровадження ефективних організаційно-економічних механізмів функціонування житлово-комунального господарства всіх форм власності.

Останнім часом виникає і поступово збільшується розрив між потребами населення в забезпеченні житлом та обсягами житлового будівництва через

економічну неспроможність придбання житла для більшості населення. Розміщення житлового будівництва набуває суто комерційних ознак і втрачає свій соціальний зміст.

Через відсутність соціального партнерства між місцевою територіальною громадою, органами виконавчої влади та забудовниками, економічну незацікавленість жителів у житловому будівництві, негативне ставлення населення до новобудов стає мало не найгострішою будівельною проблемою.

За відсутності прийнятих в європейській практиці граничних європейських показників сумарної поверхневої площі і відсотка забудови земельної ділянки неможливо обґрунтовано визначити граничні параметри нового об'єкта будівництва та потрібну площу земельної ділянки.

Крім того, недосконалі будівельні технології та організація будівництва не забезпечують повною мірою умови збереження існуючої прилеглої забудови та навколишнього середовища. Організаційно-технологічна схема будівництва передбачає виділення черг будівництва і розроблення будгеплану кожної черги в межах будівельного майданчика. Будівельними нормами ДБН А.3.1-5-2016 «Організація будівельного виробництва» визначено вимоги щодо заходів із збереження навколишнього середовища та прилеглих будівель за межами відведеної для будівництва земельної ділянки [8].

При цьому консервативні технології не дозволяють організувати будівельне виробництво за принципом «майданчик усередині будівлі», що б дозволило уникнути негативного впливу.

Через негативні фактори виникають конфлікти і зростають інвестиційні ризики під час будівництва на окремих земельних ділянках.

Проблеми забезпечення населення житлом і оновлення житлового фонду загострюються з певною циклічністю, що в цілому відповідає характеристиці будівельних циклів Саймона Кузнеця, якою визначена тривалість (періодичність)

циклічних коливань будівельної активності, пов'язаних із періодичним оновленням житла та деяких типів виробничих споруд – 15...20 років.

Крім того, в XXI столітті у будівництві почався новий великий цикл, пов'язаний зі зміною базових технологій, джерел енергії та об'єктів інфраструктури відповідно до теорії великих циклів М. Кондратьєва.

На початку XX століття відбулася архітектурно-будівельна революція, виникли нові планувальні та будівельні принципи і технології, зокрема, висотне та зелене будівництво. В системі світових і глобальних міст на новій основі вирішуються глобальні соціальні завдання управління розселенням людей, подолання соціальної нерівності, збереження навколишнього середовища.

Основними завданнями будівельної політики для вирішення житлової проблеми і забезпечення сталого розвитку, поліпшення екологічного стану територій постали:

- планування розвитку будівельної бази;
- удосконалення форм організації будівельного комплексу міста з урахуванням зарубіжного досвіду форм організації управління будівництвом;
- реалізація комплексу заходів, спрямованих на подолання наслідків фінансової кризи в будівельній галузі, впровадження механізмів підтримки забудовників;
- поліпшення інвестиційного клімату та конкуренції в будівельній галузі, стимулювання будівництва житла економ-класу, доступного житла;
- впровадження новітніх безпечних ресурсо- та енергозберігальних технологій будівництва;
- розроблення і впровадження ефективного механізму фінансування (кредитування) житлово-цивільного будівництва, визначення необхідної фінансово-кредитної та іпотечної інфраструктури;
- створення правових, економічних, організаційних умов для збільшення обсягів житлового будівництва, реконструкції, ремонту та модернізації

застарілого житлового фонду, його ефективної експлуатації;

- проведення модернізації та комплексної реконструкції кварталів застарілого житлового фонду, введеного в дію на початкових етапах індустріального домобудування, та створення житлового фонду, призначеного для переселення мешканців із ветхих будинків, гуртожитків й інших непридатних для проживання будівель;
- забезпечення контролю за дотриманням вимог щодо комплексного розвитку мікрорайонів нової забудови (пропорційним будівництвом житла, інженерної інфраструктури, об'єктів соціальної сфери);
- раціоналізація структури сельбищних територій та її щільності, ефективна організація управління будівництвом окремих будинків на вільних ділянках;
- удосконалення системи надання дозвільної документації (пов'язаної з виділенням земельних ділянок для будівництва нового житла, оформленням проектно-кошторисної документації тощо);
- скорочення термінів розгляду дозвільних документів, пов'язаних із будівництвом бюджетних житлових будинків, соціального і доступного житла, реконструкцією гуртожитків під нове житло;
- формування житлового фонду соціального призначення, створення умов для будівництва або придбання житла громадянами, які потребують поліпшення житлових умов відповідно до чинного законодавства;
- зменшення частки фізично і морально застарілого житлового фонду, в тому числі за рахунок зносу ветхого житлового фонду, панельних будинків, так званих «хрущовок», переселення мешканців з аварійного та зношеного житлового фонду (понад 70 %) та його поступову ліквідацію;
- упровадження прогресивних енергозберігальних архітектурно-планувальних, конструктивних, інженерних рішень у

- проектуванні жилих будинків із метою підвищення їх експлуатаційних якостей, з використанням енерго- і ресурсозберігальних технологій; зменшення вартості будівництва;
- створення нових типів житлових будинків із гнучкою конструктивною схемою, з урахуванням потреб різних демографічних груп і різних за складом сімей, у тому числі складних родин, надання перших поверхів для маломобільних груп населення та осіб із спеціальними потребами;
  - розроблення проектно-кошторисної документації, відведення земельних ділянок для будівництва соціального житла, що надаватиметься в оренду малозабезпеченим та іншим пільговим категоріям населення;
  - запровадження технічних і організаційних заходів, спрямованих на зменшення собівартості будівництва доступного та соціального житла, зокрема, шляхом відміни платежів при зборі вихідних даних (технічних умов, погоджень тощо), платежів за оренду та користування земельною ділянкою тощо;
  - щорічне збільшення обсягів будівництва соціального житла із середньою площею однокімнатних квартир до 40 м<sup>2</sup>, двокімнатних до 52...55 м<sup>2</sup>, трикімнатних до 60 м<sup>2</sup> будівництво житла для пільгових категорій населення;
  - реалізація різноманітних схем спільного фінансування будівництва житла за кошти міського бюджету, державних програм та населення (50/50; 40/60; 30/70 залежно від рівня доходів громадян);
  - забезпечення контролю за дотриманням вимог щодо комплексного розвитку мікрорайонів нової забудови (пропорційне будівництво житла, інженерної інфраструктури, об'єктів соціальної сфери);
  - запровадження системи моніторингу стану аварійних об'єктів житлового фонду та житлово-комунальної інфраструктури;
  - стимулювання нових форм утримання й експлуатації житлового фонду (передусім об'єднань співвласників багатоквартирних будинків);
- уведення механізму податків на нерухомість для раціонального використання житла та податкових відрахувань у міський бюджет;
  - створення правових, економічних, організаційних умов для збільшення обсягів житлового будівництва, реконструкції, ремонту та модернізації застарілого житлового фонду, його ефективної експлуатації;
  - створення умов для задоволення житлових потреб різних верств населення з урахуванням їх можливостей, гарантованого забезпечення житлом соціально незахищених громадян, зокрема, розроблення та реалізація міської програми забезпечення громадян житлом;
  - формування за рахунок новозбудованих або модернізованих будинків комунального фонду соціального житла та доступного житла, що безоплатно або на пільгових умовах надаватиметься в оренду малозабезпеченим громадянам та тим, що потребують допомоги;
  - поліпшення системи надання, оплати комунальних послуг та удосконалення системи обліку житлового фонду.
- Очікувані результати:
- модернізація та реконструкція фізично і морально застарілого житлового фонду, введеного в дію на початкових етапах індустріального домобудівництва;
  - розвиток житлового фонду, призначеного для відселення мешканців таких житлових будинків;
  - формування муніципального фонду «соціального житла», що безоплатно надаватиметься малозабезпеченими та іншим пільговим категоріям населення на умовах оренди;
  - стимулювання та виконання програм доступного, соціального та молодіжного житлового будівництва;
  - повномасштабне становлення іпотечного житлового кредитування та процедури бюджетного страхування будівельних ризиків;

- сприяння комплексному розвитку мікрорайонів, насамперед нової та садибної забудови;
- подальша реконструкція мікрорайонів історичної забудови.

Водночас, пріоритет і надалі зберігатиметься за введенням у дію житла підвищеної комфортності за кошти інвесторів та фізичних осіб (у тому числі на засадах різних видів довгострокового кредитування), а також реалізацією великих інвестиційних унікальних проєктів громадського будівництва, які мають загальнодержавне значення.

У складі міського житлового фонду очікується збільшення кількості багатоповерхових будинків, зведених в основному в «спальних» районах, та частки житлових будинків садибного типу.

Продовжуватиметься робота над унікальними проєктами, які будуть формувати новий будівельний облік просторово розосередженого загальноміського центру, що сполучатиме підцентри – урядовий, міжнародних представництв, адміністративно-діловий, фінансово-комерційний, культурний, інформаційний і торговий.

Необхідно розробити методологічний апарат планування перспективного розвитку будівельної бази для задоволення потреб масового будівництва та унікальних інноваційних об'єктів, включаючи питання ефективних технологій, будівельних конструкцій та матеріалів, можливості гнучкого нарощування обсягів та форм організації управління будівництвом (рис. 2).

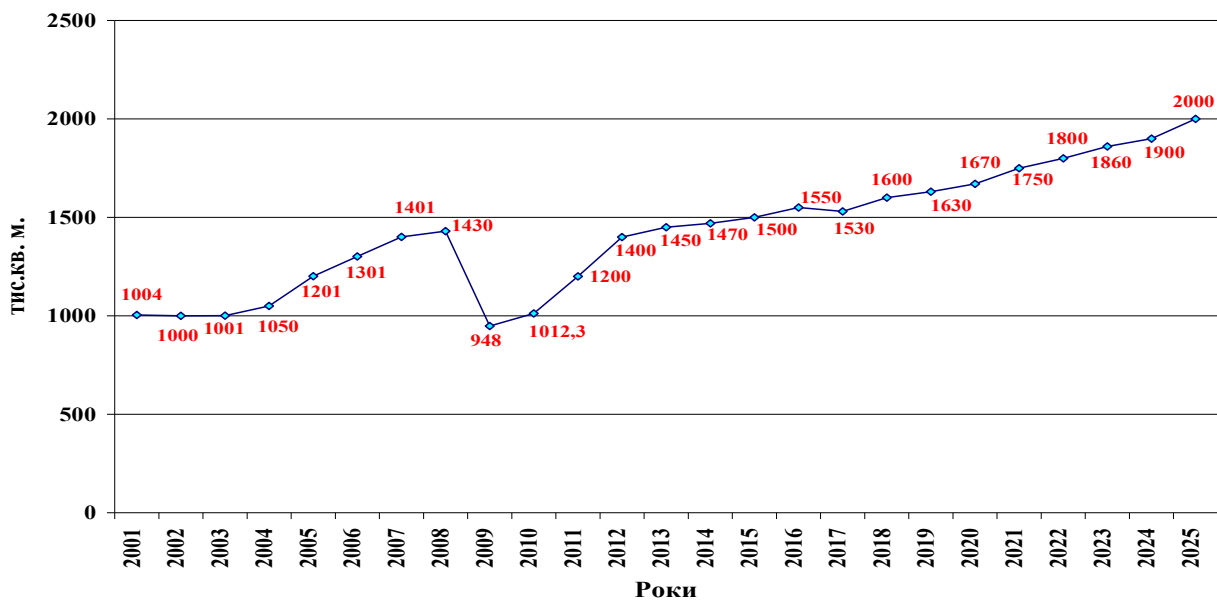


Рис. 2. Прогнозні обсяги будівництва за розрахунками проєкту генерального плану м. Київ /  
Fig. 2. Estimated volumes of construction according to the calculations of the draft general plan of Kyiv

**Висновки.** Виконаний аналіз проблем сталого розвитку великих міст України і оновлення міського житлового фонду з оцінкою перспектив формування фонду доступного та соціального житла (на прикладі м. Києва) дозволяє зробити такі висновки.

Сталий розвиток великого міста являє собою його збалансоване функціонування, забезпечення економічного зростання і

потреб населення з одночасним поліпшенням екологічного стану міського середовища в цілому, а також раціональне використання всіх ресурсів, в тому числі природних, технологічне переоснащення і реструктуризацію підприємств, удосконалення соціальної, виробничої, транспортної, інженерної інфраструктури міста, поліпшення умов проживання, відпочинку та оздоровлення, збереження і збагачення

природних ландшафтів та культурної спадщини.

У перспективних планах розвитку великих міст потрібно привести місто і його складові підсистеми в рівноважний збалансований стан та підтримувати цей стан у процесі перетворення і розвитку міста на основі науково-технічного супроводу об'єктів на різних етапах їх життєвого циклу.

Тенденції та аналіз практики проектування і забудови великих міст дозволили виділити такі типи функціонального переосвоєння міських житлових територій: переосвоєння під іншу функцію; підвищення кількісних характеристик; підвищення якісних характеристик; поліфункціоналізація простору.

Пріоритетними напрямками вирішення проблеми перспективного розвитку районів застарілої забудови постають:

- комплексне вирішення проблеми застарілого житлового фонду міста;
- отримання додаткової житлової площі за рахунок знесення застарілого житлового фонду та будівництва на його місці сучасних багатоповерхових будинків;
- ефективне та раціональне використання міських територій.

Для вирішення цієї проблеми можливо виділити такі підходи:

- збереження існуючого житлового фонду з подальшим його капітальним ремонтом і модернізацією (передбачається для житлових будівель, що не потребують поліпшення планування квартир, та з фізичним зносом основних елементів до 40 %);
- реконструкція забудови (передбачається для житлових будівель, що потребують заміни перекриттів та/або перепланування квартир, за умови фізичного зносу основних елементів до 60 %);
- реконструкція (ревіталізація) деградованих промислових будівель зі зміною їх функціонального призначення;

– знесення будинків із подальшим будівництвом нового житла, що відповідає сучасним уявленням про комфортність проживання (може бути застосовано для житлових будівель, що мають фізичний знос основних елементів понад 60 %) із комплексним благоустроєм території.

Одна з основних соціальних проблем, як в Україні в цілому, так і в м. Києві зокрема, - забезпечення населення якісним, безпечним та доступним житлом, яке відповідає сучасним вимогам. Аналіз світового досвіду проектування, будівництва та експлуатації фонду доступного житла та житлового фонду соціального призначення дозволив визначити шляхи їх формування:

- реконструкція житлових будинків першого періоду індустріального домобудування (50-60-ті рр. минулого століття);
- реконструкція недіючих гуртожитків і спальних корпусів недіючих шкіл-інтернатів;
- реконструкція недіючих громадських та промислових будівель;
- проектування нових житлових будинків (коридорного та галерейного типів, безліфтових та обладнаних ліфтами);
- використання для будівництва доступного та соціального житла існуючої індустріальної бази і місцевих будівельних матеріалів;
- забезпечення комплексності проектування житлової забудови з необхідним соціальним мінімумом об'єктів громадського обслуговування.

При цьому необхідно виходити з прогностичних структури і обсягів нового житлового будівництва та можливостей розміщення об'єктів доступного житла в існуючих межах міст. Крім того, розвиток будівництва доступного житла передбачає наявність таких основних чинників як пільгове кредитування та забезпечення забудовників сприятливими умовами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Планирование строительства доступного жилья в генеральных планах крупных городов (на примере г. Киева) : монография / [В. И. Большаков, Т. С. Кравчуновская, С. П. Броневицкий]; под ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск : ПГАСА, 2015. – 146 с.
2. Генеральный план м. Києва. Основні положення : монографія / [Броневицкий С., Присяжнюк В., Дьомін М., Целовальник С., Куделін А., Нечаєва Т.]. – Київ : КМДА, 2015. – 134 с.
3. Европейская хартия городов II. Манифест новой урбанистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://wcd.coe.int/ViewDoc.jsp?id=1293215&Site=CM>.
4. Запотоцький С. Ревіталізація промислових об'єктів міста (на прикладі м. Івано-Франківська) / С. Запотоцький, О. Левицька // Часопис соціально-економічної географії. – 2016. – № 2 (21). – С. 102–106.
5. Ковальов В. В. Обґрунтування доцільності функціонального переосвоєння територій великих міст / В. В. Ковальов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпро : ПДАБА, 2017. – № 4. – С. 71–76.
6. Ковалев В. В. Реорганизация городской среды: стандарты, подходы и тенденции / В. В. Ковалев, В. Л. Седин, Д. С. Нечепуренко // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Технічні науки. – Київ : Тавр. нац. ун-т ім. В. І. Вернадського, 2018. – Т. 29 (68), № 5, ч. 3. – С. 77–82.
7. Кравчуновська Т. С. Комплексна реконструкція житлової забудови : організаційно-технологічні аспекти : монографія / Т. С. Кравчуновська. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. – 230 с.
8. Організація будівельного виробництва : ДБН А.3.1-5:2016. – Офіц. вид. – Київ : Мінрегіон України, 2016. – 54 с.
9. Система обґрунтування та вибору організаційно-технологічних рішень реконструкції будівель : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.08 / Осипов Олександр Федорович; Одеська держ. акад. буд. та арх. – Одеса, 2015. – 43 с.
10. Планування і забудова територій : ДБН Б.2.2-12:2018. – Офіц. вид. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 179 с.
11. Про регулювання містобудівної діяльності. Закон України від 17 лютого 2011 р. № 3038-VI [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17/page2>.
12. Стратегія розвитку міста Києва до 2025 року. Рішення Київської міської ради від 15 листопада 2011 р. № 824/7060 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [search.ligazakon.ua/I\\_doc2.nsf/link1/MR11160A.html](http://search.ligazakon.ua/I_doc2.nsf/link1/MR11160A.html). – Назва з екрана. – Перевірено : 07.08.2018.
13. Науково-методологічний інструментарій організації будівництва на засадах біосферосумісності : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.08 / Чернишев Денис Олегович; ДВНЗ «Придніпр. держ. академія буд-ва та архітектури». – Дніпро, 2019. – 430 с.
14. Чисельність наявного населення України на 1 січня 2015 р. / Відп. за випуск Тимошенко Г. М. – Київ : Державна служба статистики України, 2015. – 111 с.
15. Urban construction project management / L. Richard, J. Eschemuller. – N.Y. : McGraw-Hill, 2008. – 480 p.
16. Zaiats Ye. I. Risk level assessment while organizational-managerial decision making in the condition of dynamic external environment / Ye. I. Zaiats, T. S. Kravchunovska, V. V. Kovalov, O. V. Kirnos // Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2018. – № 2 (164). – Pp. 123–129. (DOI : 10.29202/nvngu/2018-2/24).
17. Sidney V. L. Project management in construction / V. Levy Sidney. – N.Y. : McGraw-Hill, 2006. – 402 p.
18. Sarka V. System of project multicriteria decision synthesis in construction / V. Sarka, E.K. Zavadskas, L. Ustinovicus, E. Sarkiene, C. Ignatavicius // Technological and Economic Development of Economy : Baltic Journal on Sustainability. – 2008. – Vol. 14, № 4. – Pp. 546–565.

## REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Kravchunovskaya T.S. and Bronevyskii S.P. *Planirovanie stroitelstva dostupnogo zhilya v generalnykh planakh krupnykh gorodov (na primere g. Kiev)* [Planning for affordable housing in the general plans of large cities (for example, Kiev city)]. Dnipropetrovsk : PSACEA Publ., 2015, 146 p. (in Russian).
2. Bronevyskiy S., Prysiashniuk V., Domin M., Tselovalnyk S., Kudelin A. and Nechaeva T. *Heneralnyi plan m. Kyiva. Osnovni polozhennia* [General plan of the Kyiv. The main provisions]. Kyiv : KMDA Publ., 2015, 134 p. (in Ukrainian).
3. Yevropeyskaya khartiya gorodov II. *Manifest novoy urbanistiki* [European Charter of Cities II. New Urban Manifesto]. (in Russian).
4. Zapototskyi S. and Levytska O. *Revitalizatsiia promyslovykh obektiv mista (na prykladi m. Ivano-Frankivska)* [Revitalization of industrial objects of the city (for example, the city of Ivano-Frankivsk)]. *Chasopys sotsialno-ekonomichnoi geografii* [Journal of socio-economic geography]. 2016, issue 2 (21), pp. 102–106. (in Ukrainian).
5. Kovalov V.V. *Obhruntuvannia dotsilnosti funktsionalnogo pereosvoiennia terytotii velykykh mist* [The substantiation of the expediency of the functional transmission of the territories of big cities]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, issue 4, pp. 71–76. (in Ukrainian).
6. Kovalyev V.V., Sedin V.L. and Nечepurenko D.S. *Reorganizatsiya gorodskoy sredy: standarty, podkhody i tendentsii* [Reorganization of the urban environment: standards, approaches and trends]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho*

- natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho* [Scientific notes of the Taurida National University named after V.I. Vernadsky]. 2018, issue 29 (68), no 5, p. 3, pp. 77–82. (in Russian).
7. Kravchunovska T.S. *Kompleksna rekonsruktsiia zhytlovoi zabudovy : organizatsiino-tekhnologichni aspekty* [Complex reconstruction of housing building : organizational and technological aspects]. Dnipropetrovsk : Nauka i osvita Publ., 2010, 230 p. (in Ukrainian).
  8. DBN A.3.1-5:2016. *Orhanizatsiia budivelnoho vyrobnytstva* [Organization of construction production]. Kyiv : Minrehion Ukrainy Publ., 2016. 54 p. (in Ukrainian).
  9. Osypov O.F. *Systema obgruntuvannya ta vyboru organizatsiino-tekhnologichnykh rischen rekonstruktsii budivel* [System of substantiation and selection of organizational and technological solutions of reconstruction of buildings. Author's abstract.]. Odesa, 2015, 43 p. (in Ukrainian).
  10. DBN B. 2.2-12:2018. *Planuvannia i zabudova terytorii* [Planning and building of territories]. Kyiv : Minrehion Ukrainy Publ., 2018, 179 p. (in Ukrainian).
  11. *Pro rehuliuвання mistobudivnoi diialnosti : zakon Ukrainy* [On the regulation of urban development activities]. Law of Ukraine dated February 17, no. 3038-VI, 2011. [Electronic resource]. (in Ukrainian).
  12. *Strategiia rozvytku mista Kyiva do 2025 roku (Strategy of development of Kyiv city until 2025)*. A decision of Kyiv city rada, 15 November 2011, no. 824/7060. (in Ukrainian).
  13. Chernyshev D.O. *Naukovo-metodolohichni instrumentarii orhanizatsii budivnytstva na zasadkh biosferosumisnosti: Dokt. Diss.* [Scientific and methodological tools for organization of construction on the basis of biosphere compatibility. Doct. Diss.]. Dnipro, 2019, 430 p. (in Ukrainian).
  14. *Chyselnist naiavnoho naseleння Ukrainy na 1 sichnia 2015 r.* [The number of existing population of Ukraine as of January 1, 2015]. Kyiv : Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy, 2015, 111 p. (in Ukrainian).
  15. Richard L. and Eschemuller J. *Urban construction project management*. N.Y., McGraw-Hill Publ., 2008, 480 p.
  16. Zaiats Ye. I., Kravchunovska T. S., Kovalov V. V. and Kirnos O. V. Risk level assessment while organizational-managerial decision making in the condition of dynamic external environment. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychogo Universytetu*. 2018, issue 2 (164), pp. 123–129.
  17. Sidney V. L. *Project management in construction*. N.Y., McGraw-Hill Publ., 2006, 402 p.
  18. Sarka V., Zavadskas E. K., Ustinovicus L., Sarkiene E., Ignatavicius C. System of project multicriteria decision synthesis in construction. *Technological and Economic Development of Economy : Baltic Journal on Sustainability*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 546–565.

Надійшла до редакції: 13.01.2018 р.



УДК: 669.017:621.771.25:621.78.019.82.083.133  
DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.33.403

## РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ МАСИ АБО ТОВЩИНИ ШАРУ ОКАЛИНИ НА ПОВЕРХНІ БУНТОВОГО ПРОКАТУ ПІСЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

ПАРУСОВ Е. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЛУЦЕНКО В. А.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, с. н. с.,  
ПАРУСОВ О. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЧУЙКО І. М.<sup>4</sup>, канд. техн. наук,  
ГОЛУБЕНКО Т. М.<sup>5</sup>, канд. техн. наук,  
СІВАК Г. І.<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [lutsenko-va@i.ua](mailto:lutsenko-va@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

<sup>4</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

<sup>5</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [sumer@i.ua](mailto:sumer@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3583-211X

<sup>6</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [allasivak@ukr.net](mailto:allasivak@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Виробництво різноманітних металовиробів з використанням гарячої пластичної деформації або термічної обробки неминуче пов'язане з процесами окиснення сталі внаслідок її взаємодії з повітрям або атмосферою печі. При цьому відбуваються зміни хімічного складу поверхневого шару металу, утворення оксидів (окаліни), трансформація їх фазового складу в процесі обробки, що, у свою чергу, залежить від температури, швидкості та способу охолодження металу. Найбільш поширений вид металовиробів, для яких окаліна не тільки нормується вимогами відповідних стандартів, а й істотно впливає на процес подальшої переробки, - бунтовий прокат. Окаліна вуглецевої сталі, що утворюється за високих температур, складається з трьох оксидів ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), фактичний вміст яких впливає на формування різної щільності, а, отже, і різної питомої маси окаліни за однакової товщини її шару на поверхні прокату. Через те, що відомі способи визначення питомої маси окаліни є досить трудомісткими і вимагають відповідної кваліфікації технічного персоналу, існує необхідність у розробленні універсального способу якісної і кількісної оцінки оксидів, які утворюються на поверхні прокату з вуглецевої сталі залежно від зміни технологічних параметрів виробництва. *Мета роботи* - розроблення способу визначення питомої маси або товщини шару окаліни, яка утворюється на поверхні бунтового прокату різного діаметра з урахуванням її фактичного хімічного складу. *Результати.* На основі відомих хімічних і фізичних закономірностей процесів, що відбуваються за високотемпературної взаємодії поверхні вуглецевих сталей з атмосферним повітрям, розроблено універсальну математичну модель, яка дозволяє визначити один із показників якості і може бути рекомендована як альтернативний спосіб визначення питомої маси або товщини шару окаліни на поверхні бунтового прокату в умовах дослідних лабораторій або металургійних підприємств.

**Ключові слова:** бунтовий прокат; питома маса окаліни; фазовий склад

## РАЗРАБОТКА УНІВЕРСАЛЬНОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ МАССЫ ИЛИ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ОКАЛИНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ БУНТОВОГО ПРОКАТА ПОСЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

ПАРУСОВ Э. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЛУЦЕНКО В. А.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, с. н. с.,  
ПАРУСОВ О. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
ЧУЙКО И. Н.<sup>4</sup>, канд. техн. наук,  
ГОЛУБЕНКО Т. Н.<sup>5</sup>, канд. техн. наук,

СИВАК А. И.<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [lutsenko-va@i.ua](mailto:lutsenko-va@i.ua), ORCIDID: 0000-0002-4604-5592

<sup>3</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

<sup>4</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

<sup>5</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [sumer@i.ua](mailto:sumer@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3583-211X

<sup>6</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49107, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [allasivak@ukr.net](mailto:allasivak@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

**Аннотация. Постановка проблемы.** Производство различных металлоизделий с использованием горячей пластической деформации или термической обработки неизбежно связано с процессами окисления стали в результате ее взаимодействия с воздухом или атмосферой печи. При этом происходят изменения химического состава поверхностного слоя металла, образование оксидов (окалины), трансформация их фазового состава в процессе обработки, что, в свою очередь, зависит от температуры, скорости и способа охлаждения металла. Наиболее массовым видом металлоизделий, для которых окалина не только нормируется требованиями соответствующих стандартов, но и оказывает существенное влияние на процесс последующей переработки, является бунтовой прокат. Окалина углеродистой стали, образующаяся при высоких температурах, состоит из трех оксидов (FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), фактическое содержание которых влияет на формирование различной плотности, а, следовательно, и различной удельной массы окалины при одинаковой толщине её слоя на поверхности проката. Ввиду того, что известные способы определения удельной массы окалины достаточно трудоёмки и требуют соответствующей квалификации технического персонала, существует необходимость в разработке универсального способа качественной и количественной оценки оксидов, образующихся на поверхности проката из углеродистой стали в зависимости от изменения технологических параметров производства. **Цель** - разработка способа определения удельной массы или толщины слоя окалины, образующейся на поверхности бунтового проката различного диаметра с учетом её фактического химического состава. **Результаты.** На основе известных химических и физических закономерностей процессов, происходящих при высокотемпературном взаимодействии поверхности углеродистых сталей с атмосферным воздухом, разработана универсальная математическая модель, которая позволяет определить один из нормируемых показателей качества и может быть рекомендована в качестве альтернативного способа определения удельной массы или толщины слоя окалины на поверхности бунтового проката в условиях исследовательских лабораторий или металлургических предприятий.

**Ключевые слова:** бунтовой прокат; удельная масса окалины; фазовый состав

## DEVELOPMENT OF UNIVERSAL METHOD FOR DETERMINING SPECIFIC MASS OR THICKNESS OF SCALE CRUST ON THE SURFACE OF WIRE ROD AFTER CONTINUOUS COOLING

PARUSOV E.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc.(Tech.), Head Researcher,*

LUTSENKO V.A.<sup>2</sup>, *Dr. Sc.(Tech.), Head Researcher,*

PARUSOV O.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc.(Tech.), Head Researcher,*

CHUIKO I.N.<sup>4</sup>, *Cand. Sc.(Tech.),*

GOLUBENKO T.M.<sup>5</sup>, *Cand. Sc.(Tech.),*

SIVAK H. I.<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [lutsenko-va@i.ua](mailto:lutsenko-va@i.ua), ORCIDID: 0000-0002-4604-5592

<sup>3</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

<sup>4</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

<sup>5</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [sumer@i.ua](mailto:sumer@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3583-211X

<sup>6</sup> Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubova Sq., Dnipro, Ukraine, 49107, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [allasivak@ukr.net](mailto:allasivak@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

**Abstract. Problem statement.** The production of various metal products using hot plastic deformation or heat treatment is inevitably linked to the processes of oxidation of steel because of its interaction with the air or atmosphere of the furnace. At the same time, changes occur in the chemical composition of the surface metal layer, the formation of oxides (scale), the transformation of their phase composition during the processing, which, in turn, depends on the temperature, speed and method of cooling the metal. The most widespread type of metal products, for which the scale is standardized not only by the requirements of the relevant standards, but also has a significant impact on the process of subsequent processing, is wire rod. The carbon steel scale, formed at high temperatures, consists of three oxides ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), the actual content of which affects the formation of various density, and, consequently, different specific mass of scale with the same thickness of its layer on the rolled surface. In view of the fact that the known methods for determining the specific mass of the scale are rather laborious and require appropriate qualifications of technical personnel, there is a need to develop a universal method for qualitative and quantitative assessment of oxides formed on the surface of carbon steel, depending on changes in the technological parameters of production. **Purpose.** Development of a method for determining the specific mass or thickness of the scale layer formed on the surface of a wire rod of various diameters, with its actual chemical composition. **Results.** Based on the known chemical and physical patterns of processes occurring during high-temperature interaction of the surface of carbon steels and atmospheric air, a universal mathematical model has been developed that allows to elaborate one of the standardized quality indicators and it can be recommended as an alternative method for determining the specific mass or thickness of the scale on the surface wire rod in the research laboratories of metallurgical enterprises.

**Keywords:** wire rod; specific mass of scale crust; phase composition

**Постановка проблеми.** Виготовлення металовиробів із використанням гарячої пластичної деформації або термічної обробки неминуче пов'язане з процесами окиснення сталі внаслідок її взаємодії з повітрям або атмосферою печі. При цьому відбуваються зміни хімічного складу поверхневого шару металу, утворення оксидів (окаліни), трансформація їх фазового складу в процесі обробки, що, у свою чергу, залежить від температури, швидкості та способу охолодження металу.

Один із найбільш масових видів металовиробів, для яких поверхнева окаліна відіграє істотну роль у процесі подальшої переробки, - бунтовий прокат. Цей вид металопрокату становить основну сировину у виробництві холодно-деформованого дроту з широким спектром сфер застосування, а якісна підготовка поверхні бунтового прокату до волочіння - одна з умов забезпечення стабільного технологічного процесу під час переробки волочінням [1].

Нагрів у печі вихідної заготовки перед початком деформації має значення лише з точки зору зменшення витрат металу на утворення первинної окаліни та зниження розвитку процесів знеуглецювання поверхні сталі. Загальна товщина та структура окаліни на поверхні бунтового прокату, який піддається охолодженню на

транспорті лінії Стелмор, залежить від температури виходу металу з останньої кліти дротяного блоку та швидкості безперервного охолодження до температур  $\sim 200$  °C [2]. Зміна зазначених параметрів істотно впливає на процеси формування окаліни і визначає кінцевий результат - фактичну масу окаліни та товщину її шару на поверхні прокату.

Окаліна вуглецевої сталі, що утворюється за високих температур, як правило, складається з трьох оксидів:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [3]. Оксиди розташовуються шарами у відповідності зі зменшенням вмісту кисню у напрямку від зовнішнього шару до внутрішнього. За твердості металу  $\sim 140$  HV твердість  $\text{FeO}$  складає 270...350 HV,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  - 420...500 HV та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 1 300 HV [4]. Вюстит має мінімальну адгезію до поверхні металу, незначну абразивність та найкращим чином видаляється як механічним, так і хімічним способами [5]. Тому окаліна, яка складається переважно з  $\text{FeO}$ , найбільш сприятлива для підготовки поверхні бунтового прокату до волочіння на переробці металевих виробів [5].

При виході з останньої кліти дротяного блоку на поверхні прокату практично відсутня окаліна, і чим вища температура завершення деформації, більша тривалість охолодження, тим товщій формується шар

окаліни. В інтервалі температур початку прискореного повітряного охолодження 850...950 °C за різних швидкостей на поверхні високовуглецевої сталі може утворюватися окаліна, яка складається з ~ 64...90 % FeO, 36...10 % Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у вигляді слідів [6; 7]. За високих температур термодинамічно стабільні всі три оксиди, але у міру зниження температури (нижче 570 °C) вюстит може розпадатися з утворенням Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe. З метою збереження у складі окаліни максимальної кількості FeO слід застосовувати регульоване двоступінчасте охолодження сталі, особливо в інтервалі температур 600...200 °C зі швидкістю охолодження не меншою за 4 °C/c (рис. 1).

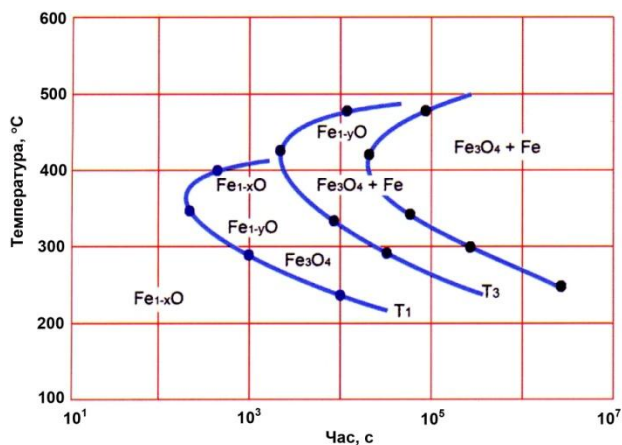


Рис. 1. Діаграма ізотермічного перетворення оксидів заліза [8] / Fig. 1. Diagram of isothermal conversion of iron oxides [8]

У разі зниження швидкості охолодження кількість Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в окаліні зростає, що значно ускладнює процес підготовки поверхні прокату до волочіння.

**Мета роботи** – розроблення універсального способу визначення питомої маси або товщини шару окаліни, що утворюється на поверхні бунтового прокату, з урахуванням її фактичного хімічного складу.

**Матеріал і методика досліджень.** Матеріалом служили промислові партії бунтового прокату діаметром 5,5...12,0 мм із вмістом вуглецю 0,05...0,87 %, охолодженого після гарячої пластичної деформації на транспортері лінії Стелмор. Товщину шару окаліни визначали

металографічним методом за допомогою світлового оптичного мікроскопа «Axiovert 200 M MAT» на поперечних шліфах. Загальну масу окаліни на поверхні прокату визначали за методикою компанії «Beckaert» та згідно з вимогами ДСТУ 3683-98 [9]. Фазовий аналіз складу окаліни визначали на рентгенівському дифрактометрі «ДРОН-3» у спектрі Co-K $\alpha$  випромінювань із застосуванням K $\beta$ -фільтра в діапазоні кутів лічильника 30...55°. Для кількісного аналізу використовували інтегральні інтенсивності дифракційних ліній без накладень: (200) для FeO, (311) для Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, (112) для Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Під час атестацій бунтового прокату згідно з відповідними стандартами контролюють комплекс якісних показників, в результаті чого визначають питому масу або товщину шару окаліни на поверхні металу. Існуючі способи визначення маси окаліни на поверхні прокату доволі трудомісткі та вимагають проведення великої кількості операцій, що включають відбір зразків, їх підготовку, зважування, розтягування з відносним подовженням 6...7 %, травлення та повторне зважування зразків. Отримані величини мас після проведених операцій визначають середню масу окаліни на поверхні прокату, залежно від параметрів режиму деформаційно-термічної обробки.

Існуючі графічні залежності для визначення загальної маси окаліни на поверхні сталі мають обмежене використання через те, що в умовах реального виробничого процесу не здатні враховувати фактичний хімічний склад оксидів за зміни швидкості повітряного охолодження прокату. Це викликає необхідність проведення вищезазначених трудомістких операцій та витрати зайвого часу. Тому автори цієї статті розробили універсальний спосіб визначення якісних показників окаліни, що формується на поверхні прокату круглого перерізу, який не залежить від зміни параметрів виробничого процесу.

Запропонований спосіб базується на математичній моделі, яка враховує хімічні й фізичні процеси, що відбуваються за

високотемпературної взаємодії поверхні вуглецевої сталі з повітрям, а також враховує подальше охолодження прокату до температури приміщення цеху з різними швидкостями.

Визначення питомої маси окалини на поверхні бунтового прокату. Для розрахунку питомої маси окалини на поверхні бунтового прокату попередньо визначається середня товщина її шару, а також хімічний склад. У проведенні розрахунків утворення гематиту ( $Fe_2O_3$ ) не враховували, спираючись на те, що зазначений оксид у виробництві бунтового прокату зустрічається в складі окалини у вигляді слідів й істотно не повинен впливати на підсумковий результат. Щільність окалини заданого хімічного складу визначається за такою формулою:

$$\rho_{ок} = \frac{\rho_{FeO} \cdot m_{FeO} + \rho_{Fe_3O_4} \cdot m_{Fe_3O_4}}{100}, \quad (1)$$

де  $\rho_{ок}$  – щільність окалини заданого хімічного складу,  $кг/м^3$ ;  $\rho_{FeO}$  – щільність вюститу,  $5\,745\,кг/м^3$ ;  $\rho_{Fe_3O_4}$  – щільність магнетиту,  $5\,170\,кг/м^3$ ;  $m_{FeO}$  – масова частка вюститу в окаліні, %;  $m_{Fe_3O_4}$  – масова частка магнетиту в окаліні, %.

Далі розраховується показник ( $K$ ), який характеризує співвідношення маси кисню до маси заліза в окаліні:

$$\rho_{Fe} \cdot (1+K) \cdot d^2 - (4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}) \cdot d + 4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}^2 - D^2 \cdot \rho_{Fe} \cdot (1+K) = 0, \quad (3)$$

де  $\rho_{Fe}$  – щільність заліза,  $7\,874\,кг/м^3$ ;  $d$  – діаметр прокату за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло до окалини, м;  $h_{ок}$  – середня товщина шару окалини на поверхні прокату, м;  $D$  – номінальний діаметр прокату, м.

$$\underbrace{\rho_{Fe} \cdot (1+K) \cdot d^2}_{ax^2} + \underbrace{-(4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}) \cdot d}_{bx} + \underbrace{4 \cdot \rho_{ок} \cdot h_{ок}^2 - D^2 \cdot \rho_{Fe} \cdot (1+K)}_c = 0$$

Визначивши усі необхідні дані, можна знайти питому масу окалини на поверхні

$$K = \frac{m_O}{m_{Fe}} = \frac{22,27 \cdot m_{FeO} + 27,64 \cdot m_{Fe_3O_4}}{77,73 \cdot m_{FeO} + 72,36 \cdot m_{Fe_3O_4}}, \quad (2)$$

де  $K$  – показник співвідношення маси кисню до маси заліза в окаліні;  $m_O$  – масова частка кисню в окаліні заданого складу, %;  $m_{Fe}$  – масова частка заліза в окаліні заданого складу, %;  $m_{FeO}$  – масова частка вюститу в окаліні, %;  $m_{Fe_3O_4}$  – масова частка магнетиту в окаліні, %.

За високих температур частина заліза з поверхні прокату витрачається на формування окалини. Після завершення процесів окиснення сталі фактичний діаметр прокату відрізняється від початкового (номінального) на величину шару заліза, яке перейшло в окаліну. Попередньо встановивши за допомогою металографічного аналізу середню товщину шару окалини, яка сформувалася під час повітряного охолодження, для коректного визначення її питомої маси на поверхні прокату необхідно розрахувати діаметр прокату за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло до окалини. Іншими словами, необхідно визначити фактичний діаметр прокату, на якому розташовується окаліна з відомою товщиною її шару. Діаметр прокату за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло в окаліну, розраховують за такою формулою:

Вираз (3) можна подати у вигляді квадратного рівняння, корінь якого і буде дорівнювати діаметру прокату  $d$  за вирахуванням товщини шару заліза, яке перейшло в окаліну:

бунтового прокату будь-якого номінального діаметра за допомогою виразу:

$$M_{ок} = \frac{((2h_{ок} + d)^2 - d^2) \cdot 0,127\rho_{ок}}{D^2}, \quad (4)$$

де  $M_{ок}$  – маса окалини на поверхні однієї тонни прокату, кг/т;  $h_{ок}$  – середня товщина шару окалини на поверхні прокату, м.

Метадослідження – розроблення універсального способу, а тому з урахуванням наведених даних стає можливим розв’язати зворотню задачу – знаючи питому масу окалини та її хімічний склад, визначити середню товщину шару окалини на поверхні прокату.

*Визначення товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату.* Для розрахунку середньої товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату попередньо визначається її питома маса і фактичний хімічний склад. Далі розраховується щільність окалини заданого хімічного складу і показник  $K$  згідно з виразами (1) й (2) відповідно. Діаметр прокату за вирахуванням товщини шару

заліза, яке перейшло до окалини, розраховується за формулою:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{D^2 \cdot M_{ок}}{1000 \cdot (1 + K)}}, \quad (5)$$

Маса окалини на одному погонному метрі прокату складає:

$$m_{ок} = \frac{(\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot \rho_{Fe} \cdot (1 + K))}{4}, \quad (6)$$

де  $\pi$  – постійна  $\Pi = 3,1416$ .

Отже, середня товщина шару окалини на поверхні прокату будь-якого номінального діаметра може бути визначена за допомогою формули:

$$h_{ок} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot m_{ок}}{\pi \cdot \rho_{ок}} + d^2} - d}{2}, \quad (7)$$

Узагальнені результати лабораторних досліджень особливостей формування окалини на поверхні бунтового прокату промислових партій наведені у таблиці.

Таблиця

*Результати лабораторних досліджень окалини на поверхні бунтового прокату /  
Results of laboratory tests of scale on the surface of riot rolled metal*

Кількість партій	Діаметр прокату, мм	Вміст вуглецю в сталі, %	Фазовий склад окалини, %			Товщина шару окалини, мкм	Питома маса окалини, кг/т
			FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
37	5,5...11,0	0,05...0,87	63...84	35...15	до 2	7...24	1,7...12,2

Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних визначення питомої маси окалини та її товщини на поверхні прокату круглого перерізу широкого спектра діаметрів і марок сталей показав високу збіжність результатів (похибка визначення результату не перевищувала 6%). Висока збіжність розрахункових і експериментальних даних,

отриманих для промислових умов на стандартному високошвидкісному прокатному стані, зумовила розроблення програмної оболонки CalcScale<sup>©</sup> (рис. 2), яка заснована на наведеному в статті алгоритмі розрахунку та може бути використана для оперативного контролю окалини на поверхні бунтового прокату [10].

Исходный диаметр проката			5,52 мм		
Масса окалины	4,58	кг/т			
Массовая доля FeO в окалине	72,5	%			
Физическая плотность стали	7874	кг/м <sup>3</sup>			
Плотность FeO	5745	кг/м <sup>3</sup>			
Плотность Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5170	кг/м <sup>3</sup>			
Массовая доля кислорода в FeO	22,27	%			
Массовая доля кислорода в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72,36	%			
Массовая доля железа в FeO	77,73	%			
Массовая доля железа в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72,36	%			

Результаты расчета:		
Плотность окалины заданного фазового состава	5 587	кг/м <sup>3</sup>
Массовая доля кислорода в окалине заданного фазового состава	23,75	%
Массовая доля железа в окалине заданного фазового состава	76,25	%
Толщина слоя железа перешедшего в окалину	4,82	мкм
Соотношение массы окалины и массы перешедшего железа	0,3114	
Диаметр проката без учета толщины слоя окалины	5,510	мм
Масса окалины на 1 м.п. проката	0,0009	кг/м
Толщина слоя окалины	8,9	мкм

Рис. 2. Робоче вікно програмної оболонки CalcScale<sup>©</sup> / Fig. 2. CalcScale program window<sup>©</sup>

Особливість програмної оболонки CalcScale<sup>©</sup> полягає у високій точності розрахунків, результати яких не залежать від зміни параметрів технологічного процесу виробництва бунтового прокату, тому що необхідні вимірювання та розрахунки проводяться на зразках, на поверхні яких уже сформувалась остаточна окалина із заданими властивостями.

**Висновки.** На основі хімічних і фізичних закономірностей процесів, які відбуваються за високотемпературної взаємодії поверхні вуглецевої сталі з повітрям, із подальшим безперервним охолодженням до кімнатної температури, розроблено математичну модель для визначення питомої ваги або товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату різного діаметра залежно від її фактичного фазового складу. Отримані результати лабораторних та експериментальних

досліджень дозволили створити універсальну програмну оболонку CalcScale<sup>©</sup>, яка може бути використана для контролю одного з показників якості бунтового прокату, що нормується відповідними стандартами, а саме для якісної і кількісної оцінки окалини в умовах дослідних лабораторій і металургійних підприємств.

Визначення товщини шару окалини на попередньо підготовлених поперечних мікрошліфах вуглецевої сталі може бути поєднане з металографічним аналізом параметрів структури, що суттєво прискорить час, необхідний для атестаційного контролю бунтового прокату в умовах заводських центральних лабораторій. Згідно з отриманими результатами досліджень подано заявку на отримання патенту України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки : монография / [В. В. Парусов, А. Б. Сычков, Э. В. Парусов]. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2012. – 376 с.
2. В. В. Парусов Взаимосвязь толщины и удельной массы окалины на поверхности высокоуглеродистой катанки / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, И. Н. Чуйко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 27. – Ч. 2. – С. 26–29.
3. Уменьшение окалинообразования при производстве проката: монография / [В. И. Губинский, А. Н. Минаев, Ю. В. Гончаров]. – Киев : Техника, 1981. – 135 с.
4. Технология волочильного производства. Подготовка поверхности металла к волочению : учебн. пособ. / [Ю. И. Коковихин, Х. Н. Белалов, В. А. Пинашина]. – Свердловск : УПИ им. С. М. Кирова, 1979. – 92 с.
5. Э. В. Парусов Перспективы использования экологически чистого способа подготовки поверхности бунтового проката к волочению / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко, И. Н. Чуйко // Проблемы трибологии. – 2016. – № 2. – С. 74–82.
6. Покачалов В. В. Фазовый состав окалины и дефекты, возникающие при волочении проволоки / В. В. Покачалов // Метизы. – 2006. – № 3(13). – С. 30–33.

7. Парусов Э. В. Обоснование параметров регулируемого охлаждения бунтового проката из высокоуглеродистой стали в потоке проволочного стана 320/150 ОАО «ММЗ» / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко, С. В. Долгий, Л. В. Сагура // Вестник НТУУ «КПИ». – 2016. – № 2 (77). – С. 62–70.
8. Высокоскоростная прокатка катанки : монография / [А. А. Кугушин, Ю. А. Попов]. – Москва : Металлургия, 1982. – 144 с.
9. Парусов Э. В. Анализ различных методов определения нормируемых показателей качества бунтового проката из высокоуглеродистой стали, изготовленной на линии Стелмор / Э. В. Парусов // Развитие науки в XXI веке : тез. докл. 15-й междунар. конф. (июль 2016 г.). – 2016. – С. 116–121.
10. Е. В. Парусов Спосіб оперативного визначення маси або товщини шару окалини на поверхні бунтового прокату / Е. В. Парусов, О. В. Парусов, І. М. Чуйко / Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні : міжнар. наук.-техн. конф. (26–28 березня 2019 р.). – Дніпро : НметАУ, 2019. – С. 34.

## REFERENCES

1. Parusov V.V., Syichkov A.B. and Parusov E.V. *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy proizvodstva vyisokoeffektivnykh vidov katanki* [Theoretical and technological bases of production of high species wire rod]. Dnepropetrovsk : ART-PRESS Publ., 2012, 376 p. (in Russian).
2. Parusov V.V., Parusov E.V. and Chuyko I.N. *Vzaimosvyaz tolschiny i udelnoy massy okaliny na poverhnosti vyisokouglerodisty katanki* [The correlation of thickness and specific weight of scale on the surface of high carbon rod]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Material Science, Engineering]. 2004, vol. 27, part 2, pp. 26–29. (in Russian).
3. Gubinskij V.I., Minayev A.N. and Honcharov Yu.V. *Umenshenie okalinoobrazovaniya pri proizvodstve prokata* [Decrease of scaling by production of rolled steel]. Kyiv : Tekhnika, 1981, 135 p. (in Russian).
4. Kokovihin Yu.I., Belalov H.N. and Pinashina V.A. *Tehnologiya volochilnogo proizvodstva. Podgotovka poverhnosti metalla k volocheniyu* [Technology of the drawing production. Preparation of the metal's surface to drawing]. Sverdlovsk : UPI named S.M. Kyrov, 1979, 92 p. (in Russian).
5. Parusov E.V., Sychkov A.B., Gubenko S.I. and Chujko I.N. *Perspektivy ispolzovaniya ekologicheskogo sposoba podgotovki poverhnosti buntovogo prokata k volocheniyu* [Outlook using environmentally friendly way of preparing of surfaces rolled steel to drawing]. *Problemy tribologii* [Tribology problems]. 2016, no. 2, pp. 74–82. (in Russian).
6. Pokachalov V.V. *Fazovyy sostav okaliny i defekty, vznikayushie pri volochenii provoloki* [The phase composition of scale and defects arising from wire drawing]. *Metizy* [Hardware]. 2006, no. 3 (13), pp. 30–33. (in Russian).
7. Parusov E.V., Sychkov A.B., Gubenko S.I., Dolgiy S.V. and Sahura L.V. *Obosnovaniye parametrov reguliruyemogo okhlazhdeniya buntovogo prokata iz vysokouglerodisty stali v potoke provolochnogo stana 320/150 ОАО «ММЗ»* [Rationale of the parameters of controlled cooling of rolled steel from high-carbon steel in the stream of a 320/150 wire mill of JSC "MMZ"]. *Vestnik NTUU «KPI»* [Bulletin of NTUU "KPI"]. 2016, no. 2 (77), pp. 62–70. (in Russian).
8. Kugushin A.A. and Popov Yu.A. *Vysokoskorostnaya prokatka katanki* [High speed rolling rod]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1982, 144 p. (in Russian).
9. Parusov E.V. *Analiz razlichnykh metodov opredeleniya normiruemykh pokazateley kachestva buntovogo prokata iz vyisokouglerodisty stali, izgotovlennoy na linii Stelmor* [Analysis of various methods for determining the mass scale and the extent of its removability from the surfac highcarbon rolled steel made on line Stelmor]. *Tezisy dokladov 15-oy mezhdunar. konf. «Razvitie nauki v XXI veke»* [The development of science in the XXI century : abstracts of the report 15th Intern. conf.]. July, 2016, pp. 116–121. (in Russian).
10. Parusov E.V., Parusov O.V. and Chuiko I.M. *Sposib operatyvnoho vyznachennia masy abo tovshchyny sharu okalyny na poverkhni buntovoho prokatu* [Method of immediately determination of mass or thickness of scale on a surface of rolled steel rolled steel]. *Informatsiini tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni : Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia* [Information technologies in metallurgy and machine building : Intern. Sci.-Tech. Conf.]. Dnipro : NMetAU Publ., 26–28 of March, 2019, p. 34. (in Ukrainian)

Надійшла до редакції: 25.01.2018 р.



УДК 666.94.015.7

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.41.404

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МОДИФІКОВАНОЇ ЦЕМЕНТНОЇ СИСТЕМИ НА РАННІХ СТАДІЯХ ТВЕРДНЕННЯ БЕТОНУ

ПШІНЬКО О. М.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

РУДЕНКО Д. В.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup> Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 69006, тел. +38(056)3731544, e-mail: [pshinko@mail.diit.edu.ua](mailto:pshinko@mail.diit.edu.ua)

<sup>2\*</sup> Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 69006, тел. + 38 (098) 214-04-85, e-mail: [veberc@ukr.net](mailto:veberc@ukr.net), ORCID 0000-0003-0827-042X

**Анотація. Постановка проблеми.** Визначення типів зв'язків, що утворюються у модифікованій цементній матриці бетону, і оцінка якості цих зв'язків у неоднорідному матеріалі для з'ясування геометричних і фізичних співвідношень між структурою модифікаторів і цементної матриці на ранній стадії структуроутворення. **Методика.** Дослідження процесів гідратації і структуроутворення звичайних і модифікованих цементних систем проводилися з використанням рентгенофазового, диференційно-термічного та мікроскопічного аналізів, інфрачервоної спектроскопії. Аналіз структурних параметрів цементної матриці бетону проводився методом ртутної порометрії, а також за адсорбцією пар води та азоту. **Результати.** Система складання з відповідною структурою формується при компонуванні і контактуванні мінеральних компонентів цементної системи і зерен заповнювачів у процесі змішування з водою, перемішування і укладання бетонної суміші. Зміна кількісних характеристик структури модифікованого бетону спостерігалася за зміни інтенсивності модифікування. Спостережувані зміни морфологічної структури цементної матриці не можуть бути випадковими, тому що вони підтверджені повторними дослідженнями за відтворюваності від 82 до 96 %. У той же час така зміна морфології новоутворень не спостерігалася у звичайному бетоні. З наведених даних очевидне значне збільшення пластинчасто-призматичної складової в цементній матриці модифікованого бетону. Зі збільшенням часу витримки кількість сформованих кристалічних новоутворень збільшується. Це можна пояснити системним підходом: морфологія структури цементної матриці - результат взаємодії систем складання і зростання. При цьому система зростання (перекристалізації і розвитку структури в часі) може ефективно розвиватися без досить повного розвитку системи складання (накопичення первинних продуктів гідратації). **Наукова новизна.** Вперше встановлено особливості структуроутворення модифікованої цементної системи, які полягають у тому, що кристали гідрату хлороксиду магнію швидко ростуть у просторі між гідратними новоутвореннями клінкерних мінералів, а механічне зчеплення, що виникає в результаті цього, зумовлює розвиток початкової міцності і жорсткості. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка зумовлює зростання міцності; вперше встановлено, що у модифікованій цементній системі, що гідратується, в результаті взаємодії різних макроіонів розвивається структуротвірний процес із переважанням активних частин, які значно перевищують його дисипативну частину порівнянно з нормальними умовами тверднення. Результати, отримані під час моделювання поведінки модифікованої цементної системи, що гідратується, показують, що в системі спостерігаються коливання концентрації проміжних продуктів гідратації, ототожені з виникненням просторово-часової структури. **Практична значимість.** Фізико-хімічне модифікування цементної системи забезпечує зміну морфотропії кристалогідратних новоутворень, що сприятиме формуванню проектних властивостей бетону.

**Ключові слова:** модифікований бетон; цементна система; структурні характеристики; система зростання

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ НА РАННИХ СТАДИЯХ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

ПШІНЬКО А. Н.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

РУДЕНКО Д. В.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup> Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 69006, тел. +38(056)3731544, e-mail: [pshinko@mail.diit.edu.ua](mailto:pshinko@mail.diit.edu.ua)

<sup>2\*</sup> Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 69006, тел. + 38 (098) 214-04-85, e-mail: [veberc@ukr.net](mailto:veberc@ukr.net), ORCID 0000-0003-0827-042X

**Аннотация. Постановка проблемы.** Определение типов связей, возникающих в модифицированной цементной матрице бетона, и оценка качества этих связей в неоднородном материале для определения геометрических и физических соотношений между структурой модификаторов и цементной матрицы на ранней

стадии структурообразования. **Методика.** Исследования процессов гидратации и структурообразования обычных и модифицированных цементных систем проводились с использованием рентгенофазового, дифференциально-термического и микроскопического анализов, инфракрасной спектроскопии. Анализ структурных параметров цементной матрицы бетона проводился методом ртутной порометрии, а также по адсорбции паров воды и азота. **Результаты.** Система сложения с соответствующей структурой формируется при компоновке и контактировании минеральных компонентов цементной системы и зерен заполнителей в процессе смешивания с водой, перемешивания и укладки бетонной смеси. Изменение количественных характеристик структуры модифицированного бетона наблюдалось при изменении интенсивности модифицирования. Наблюдаемые изменения морфологической структуры цементной матрицы не могут быть случайными, так как они подтверждены повторными опытами при воспроизводимости от 82 до 96 %. В то же время, такое изменение морфологии новообразований не отмечено в обычном бетоне. Из приведенных данных очевидно значительное увеличение пластинчато-призматической составляющей в цементной матрице модифицированного бетона. С увеличением времени выдержки количество сформированных кристаллических новообразований увеличивается. Это можно объяснить системным подходом: морфология структуры цементной матрицы является результатом взаимодействия систем сложения и роста. При этом система роста (перекристаллизация и развитие структуры во времени) может эффективно развиваться без достаточного полного развития системы сложения (накопления первичных продуктов гидратации). **Научная новизна.** Впервые установлены особенности структурообразования модифицированной цементной системы, заключающиеся в том, что кристаллы гидрата хлороксида магния быстро растут в пространстве между гидратными новообразованиями клинкерных минералов, а механическое сцепление, возникающее в результате этого, обуславливает развитие начальной прочности и жесткости. Так как свободному росту кристаллов препятствует недостаток пространства, кристаллы взаимно прорастают, образуя плотную структуру, которая обуславливает рост прочности; впервые установлено, что в гидратирующейся модифицированной цементной системе в результате взаимодействия различных макроионов развивается структурообразующий процесс с преобладанием активных частей, которые значительно превышают его диссипативную часть по сравнению с нормальными условиями твердения. Результаты, полученные при моделировании поведения гидратирующейся модифицированной цементной системы, показывают, что в системе наблюдаются колебания концентрации промежуточных продуктов гидратации, отождествляющиеся с возникновением пространственно-временной структуры. **Практическая значимость.** Физико-химическое модифицирование цементной системы обеспечивает изменение морфотропии кристаллогидратных новообразований, что способствует формированию проектных свойств бетона.

**Ключевые слова:** модифицированный бетон; цементная система; структурные характеристики; система роста

## PECULIARITIES OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED CONCRETE CEMENT SYSTEM AT THE EARLY STAGES OF HARDENING

PSHINKO O. M., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
RUDENKO D. V., *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazariana St., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38(056)3731544, e-mail: [pshinko@mail.dniiit.edu.ua](mailto:pshinko@mail.dniiit.edu.ua)

Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazariana St., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. + 38 (098) 214 04 85, e-mail: [veberc@ukr.net](mailto:veberc@ukr.net), ORCID 0000-0003-0827-042X

**Abstract. Purpose.** Determination of the types of bonds formed in the modified concrete cement matrix and the evaluation of the quality of these bonds in a inhomogeneous material for the determination of geometric and physical relationships between the structure of modifiers and the cement matrix at the early stage of structure formation. **Method.** Investigation of the processes of hydration and structure formation of conventional and modified cement systems was carried out using X-ray diffraction, differential-thermal and microscopic analyses, and infrared spectroscopy. The analysis of the structural parameters of the cement matrix of concrete was carried out by the method of mercury porosimetry, as well as the adsorption of water and nitrogen vapor. **Results.** The system of assembling with the corresponding structure is formed during the layout and contact of the mineral components of the cement system and aggregate grains in the process of mixing with water, stirring and placing of concrete mixture. The change in the quantitative characteristics of the structure of modified concrete was observed at the change in the intensity of modification. Observed changes in the morphological structure of the cement matrix cannot be random, as they are confirmed by repeated experiments at reproducibility from 82 to 96 %. At the same time, such a change in the morphology of new formations was not observed in normal concrete. From the given data, a significant increase in the lamellar-prismatic component in the cement matrix of modified concrete is obvious. The number of formed crystalline new formations increases with the increase of curing time. This can be explained by the system approach: the morphology of the structure of the cement matrix – the result of the interaction of systems of assembly and growth. At the same time, the growth system (recrystallization and development of the structure in time) can effectively develop

without a sufficiently complete development of the system of assembly (accumulation of primary products of hydration). **Scientific novelty.** For the first time, the peculiarities of the structured formation of the modified cement system have been established, they consist in the fact that magnesium chloride hydrate crystals grow rapidly in the space between the hydrated new formations of clinker minerals, and as the result, the mechanical bond is responsible for the development of initial strength and stiffness. Since the free growth of crystals is hindered by the lack of space, the crystals mutually germinate, forming a dense structure that causes the growth of strength; it was first established that in a modified hydrated cement system, as a result of the interaction of different macroions, a structure-forming process develops with a predominance of active parts that significantly exceed its dissipative part in comparison with normal cure conditions. The results obtained in modeling the behavior of the modified cement system, which is hydrated, show that the system has fluctuations in the concentration of intermediate products of hydration, identified with the appearance of the spatial-temporal structure. **Practical relevance.** Physico-chemical modification of the cement system provides a change in the morphotropy of new crystalhydrate formations, which will contribute to the formation of the design properties of concrete.

**Keywords:** *modified concrete; cement system; structural characteristics; growth system*

**Introduction.** Prospects for the further development of high-performance concrete production and scientific and technological progress are largely determined by the knowledge of the laws and methods of controlling the processes of the structural formation of the cement matrix of concrete, taking into account the required high level of product quality and the criteria of the resource intensity of production [2].

In this connection, first of all, it is important to analyze the general patterns of formation of the structure of the material in the complex process of physical and chemical modification of the concrete mixture for monolithic structures.

**Purpose.** Determination of the types of bonds formed in the modified concrete cement matrix and the evaluation of the quality of these bonds in a inhomogeneous material for the determination of geometric and physical relationships between the structure of modifiers and the cement matrix at the early stage of structure formation.

**Method.** Investigation of the processes of hydration and structure formation of conventional and modified cement systems was carried out using X-ray diffraction, differential-thermal and microscopic analyzes, and infrared spectroscopy. The analysis of the structural parameters of the cement matrix of concrete was carried out by the method of mercury porosimetry, as well as the adsorption of water and nitrogen vapor.

**Results.** From the general positions, the structure formation of the modified cement matrix of concrete can be presented as a transformation of the system of assembly of the

initial mineral components and the system of growth of new substances that emerge at different stages of the technology [3].

The system of assembling with the corresponding structure is formed during the layout and contact of the mineral components of the cement system and aggregate grains in the process of mixing with water, stirring and placing of concrete mixture. The system of assembly is formed from the finished structural elements in the continuous occurrence of new elements of the structure, as well as intergranular pores and interparticle contacts [1; 4].

An analysis of the formation of assembly systems and their parameters was made by the mechanics of granular media. The content of this analysis is determined by the requirements of obtaining data on the patterns and nature of packaging particles in connection with their granulometric composition. In the technological sense, this is expressed in the form of tasks for selecting the optimal granulometry of the components, the optimal ratio of their volumes on the criterion of the density of the package, the minimum water content of the mixture.

At the grinding stage of the original components, the task of analyzing the assembly system can be to determine the degree of agglomeration of particles, the homogeneity of the distribution of components in each microobject of the product when grinding [6; 7].

The task of the homogeneity of the mixture is characteristic both for the stage of preparation of the concrete mixture, and, especially, when it is modified and placed.

At physical modification of the concrete mixture, the content of the problem involves studying the phenomena of repacking particles in connection with the application of physical influences. When solving these problems there's simultaneously preparing the optimal conditions for the formation and development of the system of growth (structure formation).

The system of growth with its inherent structure is created as a result of a combination of various by mineralogy, morphology and the size of dispersed particles of new formations that emerge in the process of hydration, accompanied by a physical and chemical modification of the cement matrix. In this case, the growth system is created from new formations during the technological process, and this is its fundamental difference from the system of assembly [5].

The development of the growth system reflects, first of all, the process of accumulation of cementing agent with its qualitative changes occurring in conditions of physical modification. The basis of the analysis of the formation and parameters of the growth system is the physico-chemistry of the heterogeneous processes of the emergence of a new disperse phase. The content of this analysis is conditioned by the need to obtain information on the kinetics and the dynamics of the formation of hydrated compounds, their components, the degree of dispersion, the peculiarities of contacting in the crystal intergrowth, as well as the evolution of the pore space of the cementing agent during physical modification. In practical terms, this information, which correlates with the modes of technological processes, is necessary for their management in accordance with the purpose of obtaining concrete with the necessary high quality [8; 10].

The growth system develops on the basis and within the system of assembly, transforming it, interacting with it and being under the influence of physical and chemical modification of the binder. This is expressed in the fact that the system of growth of modification with the accumulation of cementing agent takes up part of the disappearing volume as a result of hydration, as

well as a sharp narrowing of the intergranular space of the initial assembly system. The result is the following. First, the initial value of the intergranular cavernosity of the assembly system is not preserved in the synthesis of new formations. The cavernosity of the original system of assembly (without considering the growth system) usually does not increase, but under the action of the compacting is sharply reduced. In this case, the volume of the cementing agent required for grouting the aggregate grains, appears to be greater than the volume of voids formed in it. A new volume of intergranular space is almost completely filled with the cementing material with volume and pore size distribution specific for it. Thus, the structure of the porosity of modified concrete is fundamentally modified.

The interaction of the assembly and growth systems lies in the fact that during the formation of a cementing agent its contact with the surface of aggregate grains and other source components is formed. The influence of the system of assembly on the growth system at the same time is expressed by the fact that the kinetics of the accumulation and crystallization of the cementing agent, the dynamics and the mechanism of formation of the contact zone depend on the crystallographic characteristics of the values of the surface area, the specific surface energy of the particles of the assembly system, finally, on the parameters of its porous space. As experimentally proved, we can assume that the structure of the new material is a composition of the systems of assembly and growth at the appropriate stage of their interaction [9].

The resulting structure depends on the combination of all structure-forming factors that can be characterized by a certain potential of structure formation or the boundary of the formation of the cementing matrix. The magnitude of the potential is a quantitative expression of the degree of completeness of this structure in relation to the limit, ideal structure. Incomplete realization of this potential in the obtained material will be characterized by the appropriate degree of incompleteness of the structure formation process, which determines

the level of material quality according to its construction and technological properties.

Quantitatively, the degree of completeness of structure formation can be estimated by the ratio of parameters of the state of the structure, fixed at *i*-th technological conditions, to the boundary state with the maximum possible density of new formations and the limiting specific activity of surface bonds, which is principally achievable with the new technology. The degree of completion of the structure formation of *Sc* for the entire range of technological conditions is normalized in the range of values from 0 to 1.

Our quantitative estimates of the structure of various materials are implemented with some controlled reliability. For verification of structural investigations of various concrete the method of selection and preparation of statistically representative samples of the cement matrix is substantiated and applied. Special studies have established that the statistical reproducibility of the characteristics of the composition, parameters of structure, indicators of the state of the material corresponds to errors that do not exceed 7...9 %, and estimates of physical and mechanical properties - up to 9...14 %. The results of the studies are presented in the Table 1 and on Figure 1.

With almost constant ratio of volumes of hydrated phases and porous space, they undergo regular qualitative changes in time. In the solid phase, as the cementing agent exponentially accumulates, the volume of fossil minerals also exponentially decreases. Although the cementing agent at various stages of its formation is represented by a set of highly basic forms of hydrated new formation, their structure depends on the technological conditions of the formation.

The dynamics of the morphological composition of the cementing agent of

modified concrete is determined by the continuous decrease of the relative volume fraction of the sub-microcrystalline component during the entire period of curing; growth of the part of short-fiber, decrease of the lamellar-prismatic component in the stage of accumulation of new formations; a decrease in the proportion of short-fiber and an increase in the proportion of the lamellar-prismatic component at the stage of recrystallization of new formations with the accumulated (almost unchanged) amounts of the latter.

The change in the quantitative content of the cementing agent while simultaneously developing the process of morphological transformation, crystallization and recrystallization of synthesis products determine the ambiguous nature of the change in the magnitude of their total specific surface area. Specific surface passes through its maximum value in the first hours of synthesis of new formations and subsequently significantly reduced.

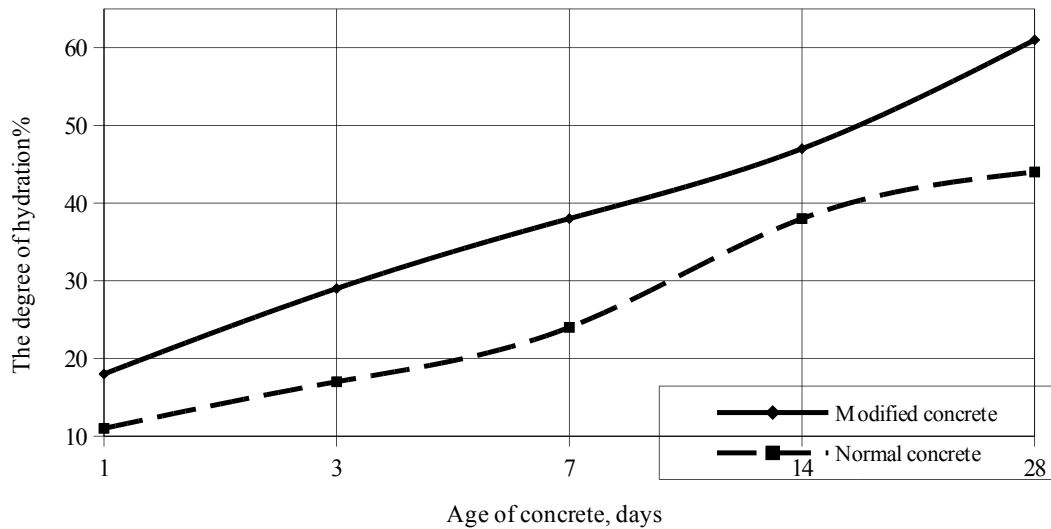
The structure of porosity at a practically constant value of porosity of a material is determined by the change in the distribution of micropores in size as the overgrown grain void of the system of assembling the initial particles with the cementing agent and the simultaneous change in the mineralogical and morphological composition, the size of the crystals. The effective pore radius as a measure of the estimation of the function of their distribution in size may decrease in the period of accumulation of the cementing agent in 4...5 times, and in the period of recrystallization of new formations, the consolidation of the crystals in the growth again increase in 1.5...2 times compared with its minimum value.

Table 1

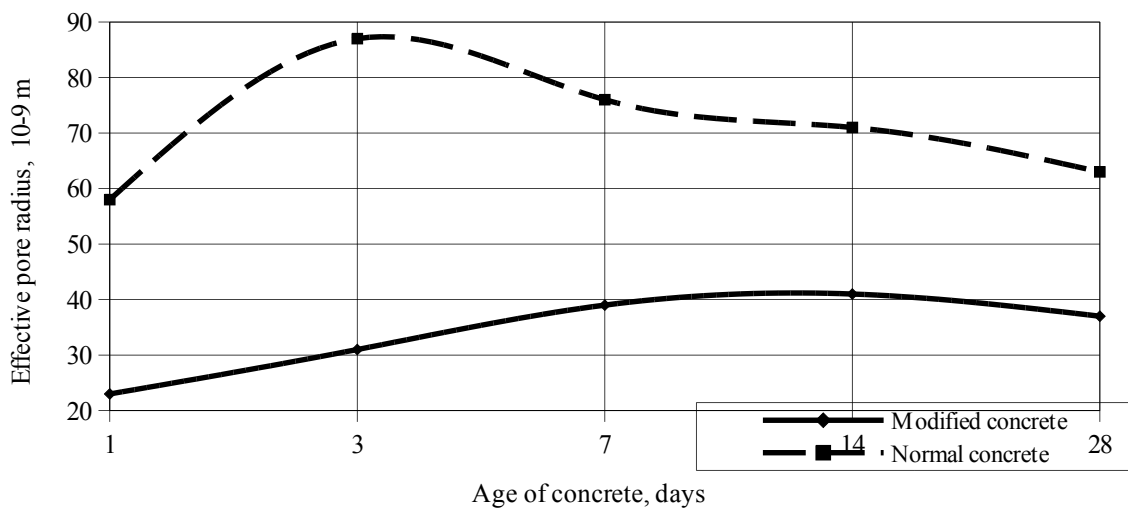
**Change of the morphological composition of the cement matrix during the curing process**

Type of concrete	Type of structure	Volume of new formations, cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> of cement matrix at age, days				
		1	3	7	14	28
Modified	Submicrocrystal	0.42	0.39	0.24	0.28	0.25
	Short-fiber	0.52	0.57	0.59	0.43	0.48

	Lamellar-prismatic	0.16	0.04	0.17	0.29	0.27
Normal	Submicrocrystal	0.22	0.29	0.34	0.31	0.28
	Short-fiber	0.42	0.66	0.63	0.63	0.58
	Lamellar-prismatic	0.36	0.05	0.03	0.05	0.14



*a – the degree of hydration of the concrete cement matrix*



*b – change in the porosity of the cement matrix of concrete*

*Fig. 1. Structural characteristics of various types of concrete*

The formation of crystalline intergrowth is due to the formation of contacts of adjoining, merging and germination of individual crystals and druses. During hardening there's a developing process of transition of the contacts from the adjoining contacts to the joints, but with a tendency to increase the degree of damage, defects of individual crystals. The bonding zones of the cementing agent with the surface of the aggregate grains are formed as an adjoining contact.

The results of experimental studies of the structure of the cement matrix are shown in Table 2, they show the consistent patterns for modified concrete. When changing the technological conditions of compacting or squeezing out water, quantitative expressions may be different, but their general character is preserved.

The change in the quantitative characteristics of the structure of modified concrete was observed at the change in the

intensity of modification. Observed changes in the morphological structure of the cement matrix cannot be random, as they are confirmed by repeated experiments at reproducibility from 82 to 96 %.

At the same time, such a change in the morphology of new formations was not

observed in normal concrete. From the given data, there's obviously a significant increase in the lamellar-prismatic component in the cement matrix of modified concrete. With increasing time of exposure, the number of formed crystalline new formations increases.

Table 2

*Morphological structure of cement matrix of modified concrete*

Morphological structure	Submicrocrystalline	Short-fiber	Lamellar-prismatic
Mineralogical composition	High-basic calcium hydrosilicates CHS	mainly CHS of tobermorite group	tobermorite with high processing time
Number of contacts per unit volume	$10^7$	$10^5$	$10^4$
Type of contacts of particles and crystals	Contacts of adjoining of globular particles	Combination of contacts adjoining and merging of crystals	Combination of adjoining, merging and germination of crystals
Size of particles and crystals, medium-sized section/ medium-length, $10^{-6}$ m	0.12/0.17	(0.14/1.1)... (0.45/4.7) <u>0,10</u> <u>0,5</u> 1,0 ... 5,0	(0.75/2.2)... (1.15/5.3) <u>0,80</u> <u>1,3</u> 2,4 ... 5,0
The average effective pore radius, $10^{-9}$ m	6...9	22...37	42...75
Specific surface area, $m^2/g$	470	120...210	43...54

This can be explained by the system approach – the morphology of the structure of the cement matrix – the result of the interaction of systems of assembly and growth. At the same time, the growth system (recrystallization and development of the structure in time) can effectively develop without a sufficiently complete development of the system of assembly (accumulation of primary products of hydration). The developed system of assembly hydration of cement particles in favorable conditions of the hydraulic pressure of the surrounding water due to thixotropy will improve the morphology of structural new formations. However, this phenomenon is not observed in normal concrete, where there is no modification of the structure. According to experimental data obtained by complex methods of studying the structure, development in volumes of similar morphological structures can reach 20 %. At the same time, the degree of hydration increases by 11...14 %.

**Scientific novelty.** For the first time, the peculiarities of the structured formation of the modified cement system have been established, they consist in the fact that magnesium chloride hydrate crystals grow rapidly in the space

between the hydrated new formations of clinker minerals, and the mechanical bond resulting from this is responsible for the development of initial strength and stiffness. Since the free growth of crystals is hindered by the lack of space, the crystals mutually germinate, forming a dense structure that causes the growth of strength.

It was first established that in a modified hydrated cement system, as a result of the interaction of different macroions, develops a structure-forming process with a predominance of active parts that significantly exceeds its dissipative part in comparison with normal cure conditions. The results obtained in modeling the behavior of the modified cement system, which is hydrated, show that the system exhibits fluctuations in the concentration of intermediate products of hydration, identified with the appearance of the spatial-temporal structure.

**Practical significance.** Physico-chemical modification of the cement system provides a change in the morphotropy of crystalhydrate new formations, which will contribute to the formation of the design properties of concrete.

**Conclusions.** It was established that the process of structure formation of the modified

cement system in the presence of organo-mineral modifying complex leads to a change in morphology of new formations in comparison with usual concrete with quantitative changes in the ratio of volumes of cryptocrystalline, needle-fibrous and lamellar-prismatic components of concrete cement matrix.

## REFERENCES

1. Adamson A. *Fizicheskaya khimiya poverkhnostey* [Physical chemistry of surfaces]. Moscow : Mir Publ., 1999, 568 p. 1999. (in Russian).
2. Batrakov V.G. *Modifitsirovannyye betony. Teoriya i praktika* [Modified concrete. Theory and practice]. Moscow : Technoproekt Publ., 1998, 768 p. (in Russian).
3. Golub T.P., Koopal L.K. and Sidorova M.P. *Adsorbtsiya kationnykh PAV na poverkhnosti oksida kremniya. I. Izotermiy adsorbtsii i poverkhnostnyy zaryad* [Adsorption of cationic SAA on the surface of silicon oxide. I. Adsorption isotherms and surface charge]. Colloid Journal, no. 66 (1), 2004, pp. 43–48. (in Russian).
4. Dukhin S.S. *Elektroprovodnost' i elektrokineticheskiye svoystva dispersnykh sistem* [Electrical conductivity and electrokinetic properties of disperse systems]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 1995, 246 p. (in Russian).
5. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow : Nauka Publ., 1970, 904 p. (in Russian).
6. Lotov V.A. *Nanodispersnyye sistemy v tekhnologii stroitel'nykh materialov i izdeliy* [Disperse systems in the technology of building materials and products]. *Stroitel'noe materialovedenie* [Journal of Building Material Science]. No. 8, 2006, pp. 5–7. (in Russian).
7. Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya: ot teorii k praktike* [Mechanics of destruction: from theory to practice]. Moscow : LKI Publ., 2007, 240 p. (in Russian).
8. Rudenko D.V. *Beton na osnovi dispersno modyfikovanoi tsementnoyi systemy* [Concrete based on a dispersedly modified cement system]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of Transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport]. No. 64 (4), 2016, pp. 169–175. (in Ukrainian).
9. Rudenko D.V. *Doslidzhennya napruzhenoho stanu modyfikovanooho monolitnoho betonu* [Investigation of the stressed state of modified monolithic concrete]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of Transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport]. No. 6, 2016, pp. 166–174. (in Ukrainian).
10. Rudenko D.V. *Modyfikovani betony dlya vysotnykh sporud* [Modified concrete for high-rise structures]. *Effektivnye tekhnologii v stroitel'stve : mater. mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* [Effective technologies in construction: materials of the international scientific and technical conference]. Kyiv : KNUBA, NDIBV, ABU, 2016, pp. 107–108. (in Ukrainian).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей : учеб. пособ. / А. Адамсон. – Москва : Мир, 1999. – 568 с. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1149/1.2133374>
  2. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика : учебник / В. Г. Батраков. – Москва : Технопроект, 1998, 768 с.
  3. Голубь Т. П. Адсорбция катионных ПАВ на поверхности оксида кремния. I. Изотермы адсорбции и поверхностный заряд / Т. П. Голубь, Д. К. Купал, М. П. Сидорова // Colloid Journal. – № 66 (1). – 2004. – С. 43–48.
  4. Духин С. С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем: монография / С. С. Духин. – Киев: Наукова думка, 1995, 246 с.
  5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учеб. пособ. / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1970. – 904 с.
  6. Лотов В. А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий / В. А. Лотов // Строительное материаловедение. – № 8. – 2006. – С. 5–7.
  7. Патон В. З. Механика разрушения: от теории к практике : монография / В. З. Патон. – Москва : ЛКИ, 2007. – 240 с.
  8. Руденко Д. В. Бетон на основі дисперсно модифікованої цементної системи / Д. В. Руденко // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – № 64 (4). – 2016. – С. 169–175.
  9. Руденко Д. В. Дослідження напруженого стану модифікованого монолітного бетону / Д. В. Руденко // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – № 6. – 2016. – С. 166–174.
  10. Руденко Д. В. Модифіковані бетони для висотних споруд / Д. В. Руденко // Эффективные технологии в строительстве : матер. междунар. науч.-техн. конф. – Киев : КНУБА, НДИБВ, АБУ, 2016. – С. 107–108.
- Надійшла до редакції 15.02.2019 р.



УДК 624.012.3:620.179.16

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.49.405

## ВПЛИВ РІВНЯ НАПРУГИ У БЕТОНІ КОНСТРУКЦІЙ НА ШВИДКІСТЬ УЛЬТРАЗВУКУ

КОЛОХОВ В. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

КОЖАНОВ Ю. О.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ЗЕЗЮКОВ Д. М.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: [kolokhovdnepr@i.ua](mailto:kolokhovdnepr@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

<sup>2</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [kozhanov\\_yuriy@mail.pgasa.dp.ua](mailto:kozhanov_yuriy@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-4662-943X

<sup>3</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [denis\\_zeziukov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:denis_zeziukov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7451-992X

**Анотація. Постановка проблеми.** Забезпечення надійної експлуатації будівель та споруд спирається на визначення фізико-механічних характеристик матеріалу їх конструкцій, яке для більшості випадків можливе лише із застосуванням неруйнівних методів визначення фізико-механічних характеристик. На достовірність неруйнівних методів визначення значний вплив має рівень напружено-деформованого стану конструкцій, який достатньо проблематично визначити в конструкціях, що експлуатуються. **Мета дослідження.** Оцінити вплив рівня напружено-деформованого стану під час проведення визначення фізико-механічних характеристик у конструкціях, що експлуатуються та можливість удосконалення цієї методики. **Методика.** Порівняння проведених вимірів за допомогою приладів та прямих визначень рівня напружено-деформованого стану та статистична обробка отриманих результатів (із візуалізацією) проведено з використанням програмного комплексу EXEL. **Результати.** Дослідження підтвердили необхідність урахування рівня напружено-деформованого стану конструкції для оцінювання міцності бетону за допомогою тарувальних залежностей. Показано вплив на швидкість поширення ультразвуку в бетоні конструкції напряму, в якому розташовується прилад вимірювань. Визначено вплив рівня напружено-деформованого стану конструкції на співвідношення швидкості ультразвуку в бетоні у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Показано, що для різних типів бетонів характер залежностей не змінюється. Значні зміни співвідношення між результатами вимірювань у двох взаємно перпендикулярних напрямках свідчать про утворення дефектів структури конструкції. **Висновки.** Підтверджено вплив рівня напружено-деформованого стану у конструкції та напрямку, в якому розташовано прилад вимірювання, на результати визначення швидкості ультразвуку. Для підвищення точності визначення фізико-механічних характеристик необхідно врахування вказаних впливів під час удосконалення методики проведення вимірів. Порівняння швидкостей ультразвуку на різних гранях конструкції може бути використано як додатковий чинник при діагностуванні її технічного стану.

Ключові слова: *напружено-деформований стан; фізико-механічні характеристики; неруйнівний контроль; ультразвук*

## ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ В БЕТОНЕ КОНСТРУКЦИЙ НА СКОРОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА

КОЛОХОВ В. В.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

КОЖАНОВ Ю. А.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ЗЕЗЮКОВ Д. М.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра технологий строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: [kolokhovdnepr@i.ua](mailto:kolokhovdnepr@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

<sup>2</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [kozhanov\\_yuriy@mail.pgasa.dp.ua](mailto:kozhanov_yuriy@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-4662-943X

<sup>3</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [denis\\_zeziukov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:denis_zeziukov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7451-992X

**Аннотация. Постановка проблемы.** Обеспечение надежной эксплуатации зданий и сооружений опирается на определение физико-механических характеристик материала их конструкций, которое для большинства случаев возможно только с применением неразрушающих методов контроля физико-механических

характеристик. На достоверность неразрушающих методов контроля большое влияние оказывает уровень напряженно-деформированного состояния конструкций, который достаточно проблематично определить в эксплуатируемых конструкциях. **Цель исследования.** Оценить влияние уровня напряженно-деформированного состояния при проведении определения физико-механических характеристик в эксплуатируемых конструкциях и возможность усовершенствования этой методики. **Методика.** Сравнение проведенных измерений с помощью приборов неразрушающих методов контроля с прямыми определениями уровня напряженно-деформированного состояния и статистическая обработка полученных результатов (с визуализацией) проведена с использованием программного комплекса EXEL. **Результаты.** Проведенные исследования подтвердили необходимость учета уровня напряженно-деформированного состояния конструкции при оценке прочности бетона с помощью тарировочных зависимостей. Показано отличие скорости ультразвука в бетоне конструкции в зависимости от направления, в котором располагается прибор измерений. Определено влияние уровня напряженно-деформированного состояния конструкции на соотношение скоростей распространения ультразвуковых колебаний в бетоне в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Показано, что для разных типов бетонов характер зависимостей не меняется. Значительные изменения соотношения между результатами измерений в двух взаимно перпендикулярных направлениях свидетельствуют об образовании дефектов структуры конструкции. **Выводы.** Подтверждено влияние уровня напряженно-деформированного состояния в конструкции и направления, в котором расположен прибор измерения на результаты определения скорости ультразвука. Для повышения точности определения физико-механических характеристик необходим учет указанных воздействий при усовершенствовании методики проведения измерений. Сравнение скоростей ультразвука на разных гранях конструкции может быть использовано как дополнительный фактор при диагностировании ее технического состояния.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние; физико-механические характеристики; неразрушающий контроль; ультразвук

## INFLUENCE OF STRESS LEVEL IN CONCRETE CONSTRUCTIONS AT ULTRASOUND SPEED

KOLOKHOV V.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
KOZHANOV YU.O.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
ZEZIUKOV D.M.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76, e-mail: [kolokhovdnepr@i.ua](mailto:kolokhovdnepr@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

<sup>2</sup> Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [kozhanov\\_yurij@mail.pgasa.dp.ua](mailto:kozhanov_yurij@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-4662-943X

<sup>3</sup> Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [denis\\_zeziukov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:denis_zeziukov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7451-992X

**Abstract. Problem statement.** Ensuring the reliable operation of buildings and structures relies on the determination of the physicomaterial characteristics of the material of their structures, which for most cases is possible only with the use of non-destructive methods of determining the physicomaterial characteristics. The reliability of non-destructive control methods is greatly influenced by the level of stress-strain state of structures, which is quite difficult to determine in the structures in use. **Purpose.** To improve the accuracy of determining the physicomaterial characteristics of materials of construction, it is necessary to develop a technique that would allow to take into account the level of stress-strain state when conducting determinations in structures that are in operation. **Methods.** Comparison of measurements with the help of non-destructive testing methods with direct determinations of the level of stress-strain state and statistical processing of the results obtained (with visualization) was carried out using the EXEL software package. **Results.** Studies have confirmed the need to take into account the level of stress-strain state of the structure when assessing the strength of concrete using calibration dependencies. The difference between the ultrasound velocity in the concrete of the structure depending on the direction, in which the measurement device is located, is shown. The influence of the level of stress-strain state of the structure on the ratio of the propagation speeds of ultrasonic vibrations in concrete in two mutually perpendicular directions is determined. It is shown that for different types of concrete the nature of the dependencies does not change. Significant changes in the ratio between the results of measurements in two mutually perpendicular directions indicate the formation of structural defects of the structure. **Conclusions.** Studies have confirmed the effect of the stress-strain state on the results of measurements of the ultrasound velocity and allow to use the above mentioned method to determine the areas of the structure in which the formation of structural defects is possible.

**Keywords:** stress-strain state; physicomaterial characteristics; non-destructive control; ultrasound

**Вступ.** Надійна експлуатація будівель та споруд забезпечується відповідністю фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалу їх конструкцій проектним параметрам, незмінністю ФМХ під час експлуатації за сталих зовнішніх впливів та навантажень. Наведені в [1] дані свідчать про суттєві розбіжності між дійсними та проектними значеннями ФМХ матеріалу конструкцій. В умовах реконструкції або проведення робіт з оцінювання технічного стану будівель необхідно визначення властивостей будівельних матеріалів, що складають конструкції, з подальшим проведенням на їх підставі перевірочних розрахунків. Для виконання, здебільше можливе застосування лише неруйнівних методів визначення (НМВ) ФМХ. Один із найбільш поширених НМВ ФМХ – ультразвуковий. Серед прикладів його застосування можна навести роботи різних дослідників [2–8]. Однак на достовірність результатів НМВ значно впливає рівень напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій. Для більшості приладів, що застосовують у дослідженнях, врахувати відмінності рівня НДС у конструкції достатньо проблематично або зовсім неможливо. Умови, за яких застосовують тарувальні залежності [9–11], що використовують ультразвукові прилади, відрізняються від тих за яких вони були встановлені. Для підвищення точності визначення ФМХ матеріалів конструкції необхідно розробити методику, яка б дозволила враховувати рівень НДС у процесі проведення визначень у конструкціях, що експлуатуються.

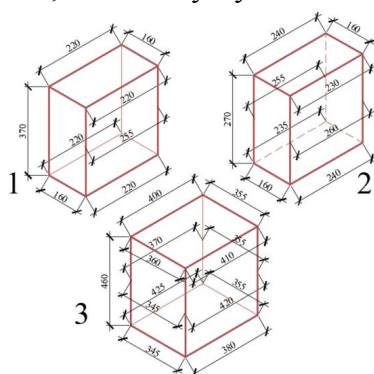


Рис. 1. Розміри зразків: 1, 2 – важкий бетон; 3 – керамзитобетон / Fig. 1. Dimensions of samples: 1, 2 – heavy concrete; 3 – claydite-concrete

**Мета дослідження** – оцінити вплив рівня напружено-деформованого стану під час проведення визначення ФМХ у конструкціях, що експлуатуються та можливість удосконалення цієї методики.

**Виклад матеріалу.** Експерименти проведено зі зразками важкого та керамзитобетону, які одбиралися під час реконструкції зі стінових керамзитобетонних панелей та панелей з важкого бетону багатоповерхового панельного житлового будинку. Фрагменти та зразки з них було вирізано без застосування ударного інструменту, щоб унеможливити появу дефектів структури бетону конструкцій, які б не були пов'язані з експлуатацією конструкцій. Розміри зразків наведені на рисунку 1.

Необхідно зауважити, що зразки з керамзитобетону мали форму, наближену до кубічної, а форма зразків із важкого бетону більше наближена до призматичної. Зовнішній вигляд зразка до випробувань показаний на рисунку 2.

Під час виконання роботи застосовано прилад «ПУЛЬСАР-1», який дозволяє визначати швидкість ультразвукових коливань (УЗК) на підставі вимірювання часу поширення на постійній базі. База вимірювання для цього приладу складає 120 мм. У використаній комплектації прилад реалізує поверхневе прозвучування.

Виміри проводились за різного рівня стискового зусилля.

Навантаження зростало ступенями з кроком 5 т.

Напруження під час руйнування зразків із важкого бетону складало  $12,39 \pm 0,96$  МПа, а для зразків із керамзитобетону  $9,52 \pm 0,24$  МПа відповідно.



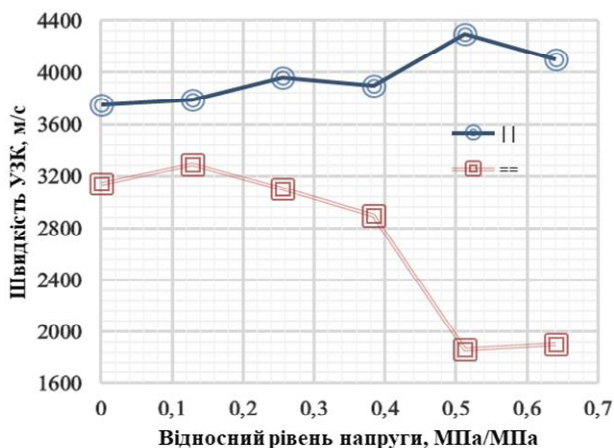
Рис. 2. Зразок з важкого бетону до випробувань / Fig. 2 Sample heavy concrete for testing

Характер руйнування зразків з важкого бетону представлено на рисунку 3.

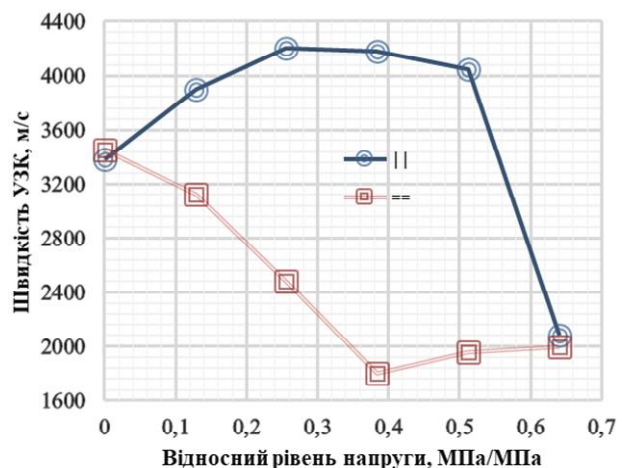


Рис. 3. Характер руйнування зразків із важкого бетону / Fig. 3. The nature of the destruction of samples of heavy concrete

Виміри проводились за схемою, що наведена на рисунку 4. Але розміри зразків Але розміри зразків та конструкція вимірювального пристрою не дозволили в повній мірі реалізувати задані (A1 та A2) зразків із керамзитобетону малюна поверхні поверхні зразків розчину. Для цих зразків визначення проводилось із чотирьох боків. Для зразків із важкого бетону виміри проводились тільки на поверхнях A1 та A2. Визначення не проводилось на поверхнях B1 та B2, оскільки отримати належну належну якість поверхні для вимірів було не можливо.



a



б (b)

Рис. 5. Залежність «швидкість УЗК - рівень напруги в частках від руйнівної» на поверхнях зразка № 1: а – А1; б – А2. Прилад вимірювання розташований: у вертикальній площині – ||; у горизонтальній площині – == / Fig. 5 The addition of the "ultrasound speed – the voltage level in fractions of the destructive" on the surfaces of sample no. 1: a – A1; b – A2. The measuring device is located: in the vertical plane – ||; in the horizontal plane – ==

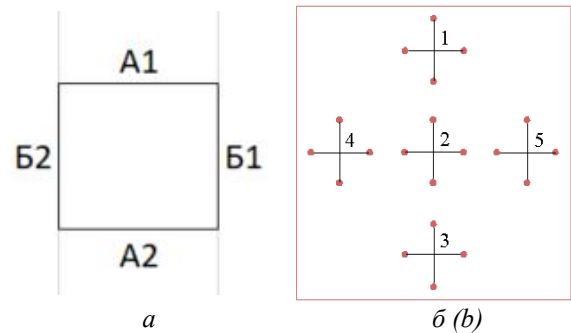


Рис. 4. Схема розміщення зон вимірів визначення швидкості ультразвуку: а) маркування граней зразка (A1, A2 – фронтальні; B1, B2 – бічні); б) розташування зон вимірювання на поверхні грані / Fig. 4. Scheme of placement of measurement zones for determining the speed of the ultrasound: a) marking the faces of the sample ( A1, A2 - front; B1, B2 – lateral); b) the location of the measuring zones on the surface of the face

На рисунках 5 та 6 для зразка № 1 наведено результати визначення швидкості УЗК в зонах 2 на поверхнях A1 та A2 зразка № 1 за різної орієнтації приладів контролю (рис. 5 відповідно) та на різних поверхнях (рис. 6 відповідно). На рисунках 7 та 8 для зразка № 2 наведено результати визначення швидкості УЗК на поверхні A1 в зонах 1 та 3 (рис. 7 відповідно) та на поверхнях A1 та A2 в зоні 2 (рис. 8 відповідно).

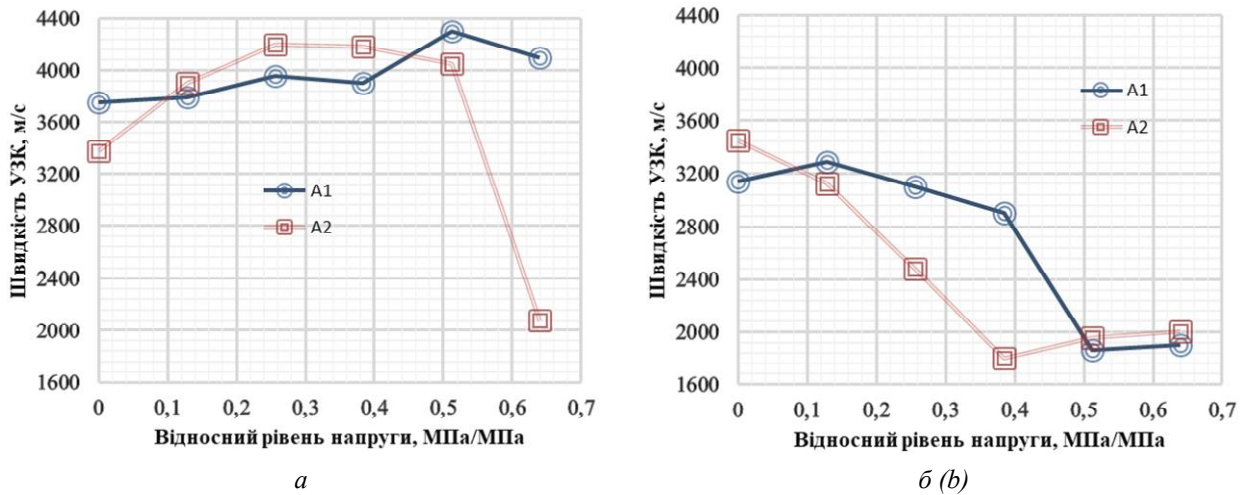


Рис. 6. Залежність «швидкість УЗК - рівень напруги в частках від руйнівної» на поверхнях А1 та А2 зразка № 1. Прилад вимірювання розташовано: а – у вертикальній площині; б – у горизонтальній площині / Fig. 6. The dependence of "ultrasound speed – the level of voltage in fractions from destructive" on surfaces A1 and A2 of sample no. 1. The measuring device is located: a – in a vertical plane; b – in the horizontal plane

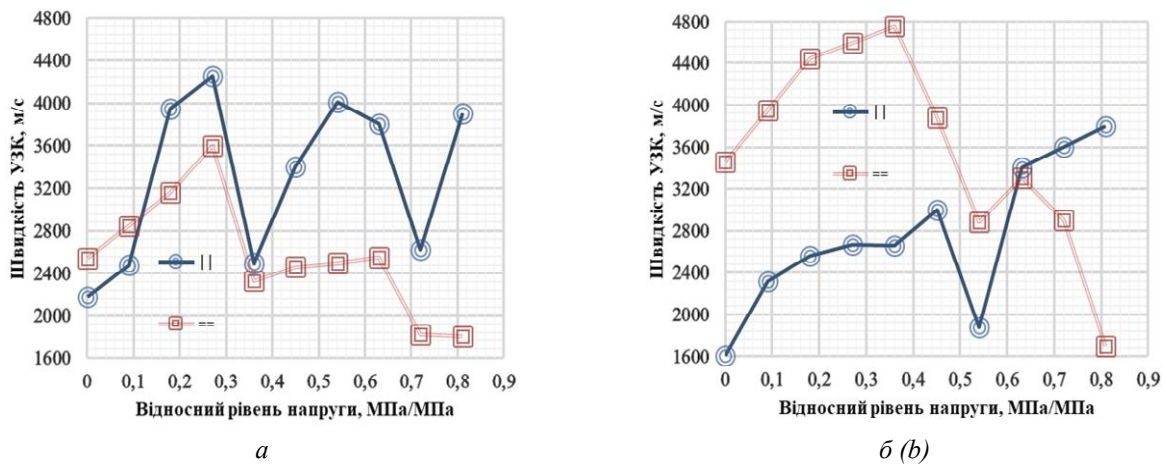


Рис. 7. Залежність «швидкість УЗК – рівень напруги в частках від руйнівної» на поверхні А1 зразка №2 в зоні: а – 1; б – 3. Прилад вимірювання розташовано: у вертикальній площині – ||; у горизонтальній площині – == / Fig. 7. The dependence of "ultrasound speed - the voltage level in fractions from destructive" on surfaces A1 of sample no. 2 in the zone: a – 1; b – 3. The measuring device is located: in the vertical plane – ||; in the horizontal plane – ==.

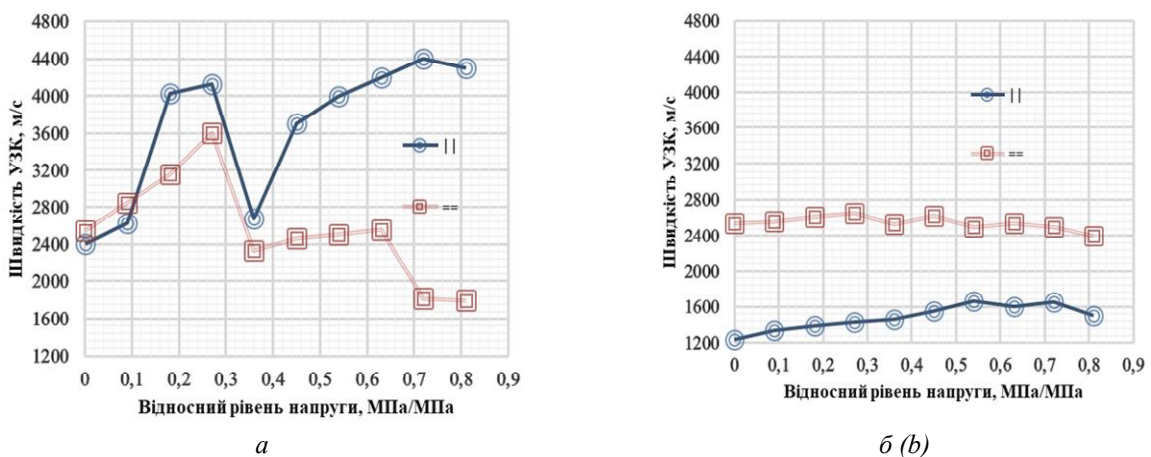


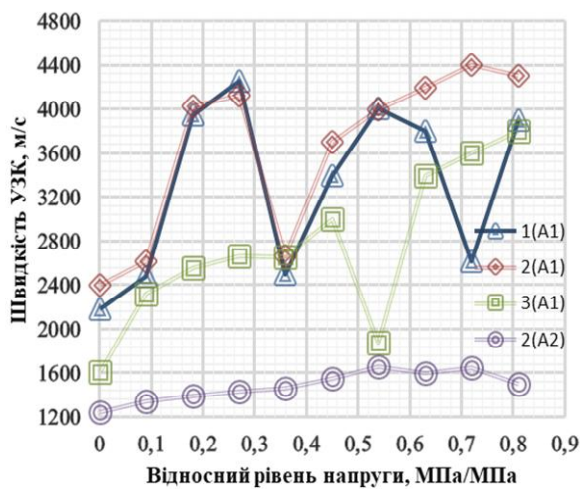
Рис. 8. Залежність «швидкість УЗК – рівень напруги в частках від руйнівної» в зоні 2 зразка № 2: а – на поверхні А1; б – А2. Прилад вимірювання розташовано: у вертикальній площині – ||; у горизонтальній площині – == / Fig. 8. Dependence of "ultrasound velocity – the level of voltage in fractions from destructive" in zone 2 of sample no. 2: a – on the surface of A1; b – A2. The measuring device is located: in the vertical plane – ||; in the horizontal plane – ==

На рисунку 9 показано характер змін швидкості УЗК для зон 1, 2 та 3 залежно від напрямку розташування приладу для зразка № 2.

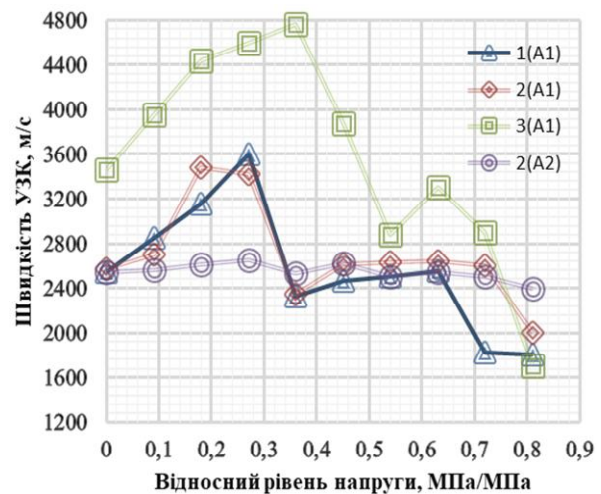
У напрямку, що збігається з напрямком дії стисного зусилля, швидкість УЗК вища, а у перпендикулярному – нижча. В той же час продемонстровано характерні відхилення від загальноприйнятих постулатів. Більшість відхилень проявилися на початку випробувань (низький рівень НДС) та в зонах зразка, що мають значний рівень неоднорідності (наявність особливостей структури зразка). Різка зміна

швидкості УЗК в межах інтервалу 0,3...0,5 відносного рівня напруги свідчить про поєднання мікротріщин у магістральні, що змінює характер роботи бетонного зразка під навантаженням.

Відмінності у залежності між відносним рівнем напруги та швидкістю УЗК на різних гранях зразка свідчать про наявність ексцентриситету прикладання навантаження на зразок. Різниця у швидкості УЗК в різних по висоті зонах зразка зумовлена відмінностями НДС у зонах, що наближені до стискових поверхонь преса.



а



б (b)

Рис. 9. Залежність «швидкість УЗК – рівень напруги в частках від руйнівної» на поверхні А1 (зони 1, 2 та 3) та А2 (зона 1) зразка № 2: а – прилад вимірювання розташовано у вертикальній площині; б – прилад вимірювання розташовано у горизонтальній площині / Fig. 9. The dependence of the "ultrasound speed – the level of voltage in the fractions from the destructive" on the surface A1 (zones 1, 2 and 3) and A2 (zone 1) of sample no. 2: a – the measuring device is located: in a vertical plane; b – the measuring device is located in a horizontal plane

На рисунку 10 наведено результати вимірювань швидкості УЗК на поверхнях Б1, Б2, А1 та А2 зразка № 3 (керамзитобетон). Залежності «швидкість УЗК – рівень напруги в частках від руйнівної», встановлені під час вимірювань для керамзитобетону, продемонстрували деякі особливості. На відміну від важкого, керамзитобетон демонструє інший характер (більш «спокійний») залежності швидкості УЗК від рівня НДС. До того ж, у керамзитобетоні лише в окремій області поверхні та за деяких значень рівня НДС простежується відмінність швидкостей УЗК в різних напрямках вимірювань.

Однією з особливостей наведених випробувань були труднощі вимірювання швидкості на внутрішній поверхні зразка (А2), оскільки оздоблювальні шари мали різні деформативні властивості з матеріалом зразка, що спричинило відшарування оздоблення.

Такі відмінності залежностей «швидкість УЗК – рівень напруги в частках від руйнівної» для важкого та керамзитобетону скоріш за все можна пояснити впливом різниці між модулем пружності матриці та наповнювача. При стисканні у важкому бетоні заповнювач проковує процес мікротріщиноутворення у

цементному камені, а в керамзитобетоні навпаки спочатку руйнується заповнювач.

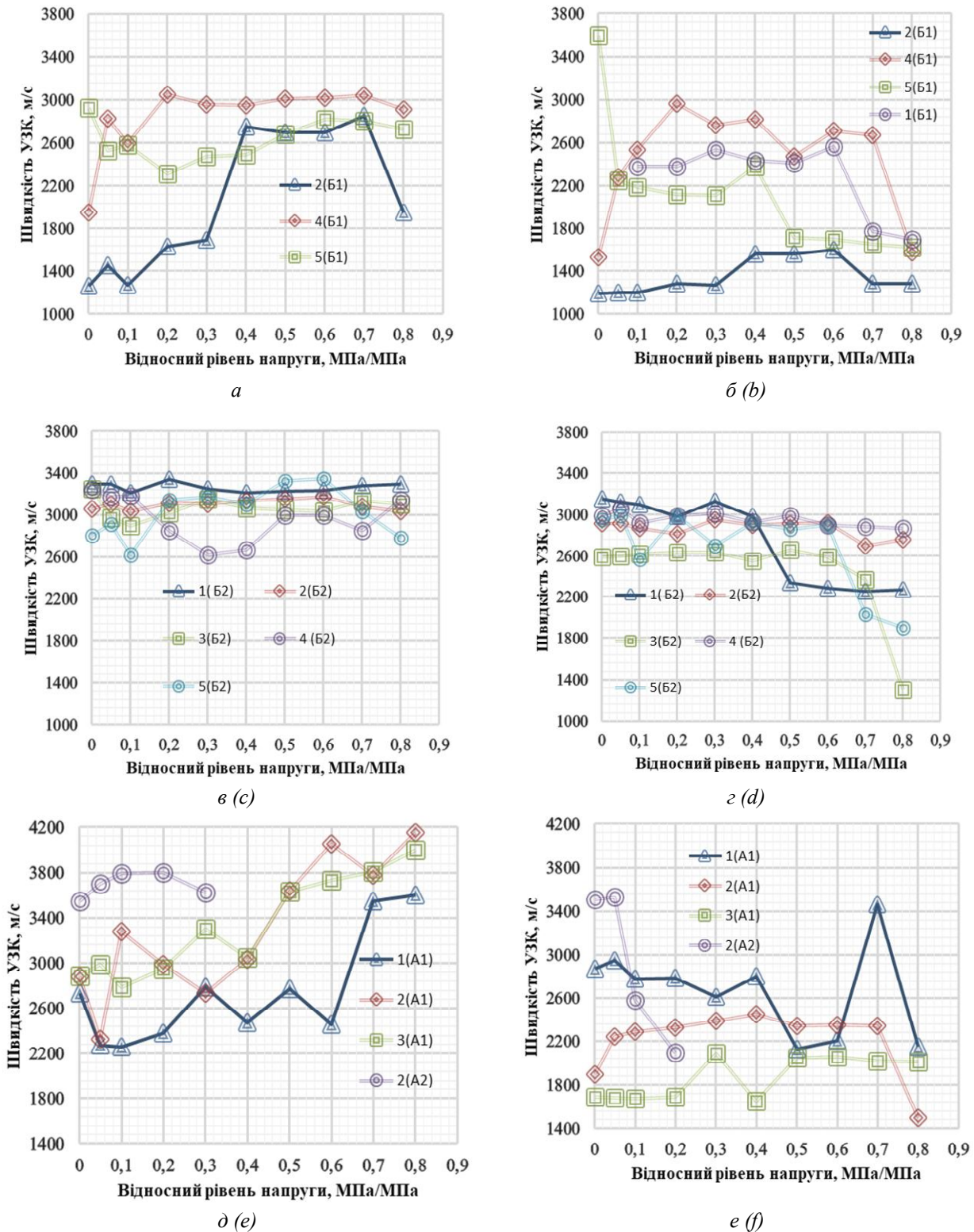


Рис.10. Залежність «швидкість УЗК – рівень напруги в долях від руйнівної» зразка № 3 на поверхні: а, б – Б1 (зони 1, 2, 4 та 5); в, г – Б2 (зони 1, 2, 3, 4 та 5); д, е – А1 (зони 1, 2 та 3) та поверхні А2 (зона 2). Прилад вимірювання розташований: а, в, д – у вертикальній площині; б, г, е – у горизонтальній площині / Fig. 10. The dependence of the "ultrasound speed – the level of voltage in the fractions from the destructive" for the sample no. 3 on the surface: а, б – B1 (zones 1, 2, 4 and 5); в, г – B2 (zones 1, 2, 3, 4 and 5); д, е – A1 (zones 1, 2 and 3) and A2 (zone 2). The measuring device is located: а, в, д – in a vertical plane; б, г, е – in a horizontal plane

Для керамзитобетону проявлено більш широкий інтервал зміни швидкості по поверхні зразка, тобто застосування тарувальних залежностей, що були побудовані на зразках буде мати меншу достовірність ніж такі самі залежності для важкого бетону.

**Висновки.** При проведенні вимірювань підтверджено вплив рівня НДС у конструкції та напрямку в якому

розташовано прилад вимірювання на результати визначення швидкості УЗК.

Для підвищення точності визначення ФМХ необхідно врахування вказаних впливів під час удосконалення методики проведення вимірів [12; 13].

Порівняння швидкостей УЗК на різних гранях конструкції може бути використано як додатковий чинник при діагностуванні її технічного стану.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kolokhov V. Structure materialphysic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure / Victor Kolokhov, Artem Sopilniak, Grygorii Gasii, Alexander Kolokhov // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7. – № 4.8. – Pp. 74–78.
2. Mori K. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete / K. Mori, A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo, I. Torigoe // *NDT and E International*. – 2002. – Vol. 35, iss. 6. – Pp. 399–406.
3. Schabowicz K. Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example / K. Schabowicz // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol. 14, iss. 2. – Pp. 295–303.
4. Chen Jun. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques / Jun Chen, Zheng Xu, Yue Yu, Yangping Yao // *NTD and E International*. Editor-in-chief D. E. Chimenti. – 2014. – Vol. 67. – Pp. 10–16.
5. Hassan A. M. T. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques / A. M. T. Hassan, S. W. Jones // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 35. – Pp. 361–367.
6. Ari Hoda. Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures / Hoda Ari, Soheil Nazarian, Deren Yuan // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 71. – Pp. 384–391.
7. Warnemuende K. Actively modulated acoustic nondestructive evaluation of concrete / Kraig Warnemuende, Hwai-Chung Wu // *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Vol. 34. – Pp. 563–570.
8. Виноградский В. М. Характер изменения свойств бетонов при одностороннем замораживании изделий / Виноградский В. М., Ткаченко Г. Г., Непомнящий А. Н., Портасова А. Д. // *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд: тези доп. II Міжнар. конф. / Одеська державна академія будівництва та архітектури*. – Одеса : ОДАБА, 2017. – С. 21–24.
9. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності : ДСТУ Б В.2.7-226:2009. [Чинний від 2010-09-01]. – Київ : ДП Укрархбудінформ, 2010. – 27 с. (Національний стандарт України).
10. Измеритель прочности бетона и стройматериалов Novotest ИПСМ / Novotest. Приборы контроля и качества : каталог // ООО НТЦ «Промышленное оборудование и технологии». – Новомосковск. – 2012. – 26 с. – Режим доступа : [https://novotest.ua/media/novotest/novotest\\_catalogue\\_rus.pdf](https://novotest.ua/media/novotest/novotest_catalogue_rus.pdf)
11. Novotest. Руководство по эксплуатации. Измеритель прочности Novotest ИПСМ / ООО НТЦ «Промышленное оборудование и технологии». – Новомосковск. – 2012. – 37 с. – Режим доступа: [https://novotest.ua/images/passporta/kontrol-stroitelnyh-materialov/%D0%A0%D0%AD\\_%D0%98%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%20%D0%98%D0%9F%D0%A1%D0%9C%20V3.1.pdf](https://novotest.ua/images/passporta/kontrol-stroitelnyh-materialov/%D0%A0%D0%AD_%D0%98%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%20%D0%98%D0%9F%D0%A1%D0%9C%20V3.1.pdf)
12. Колохов В. В. Формализация процедуры определения физико-механических свойств бетона и её аппаратное обеспечение / В. В. Колохов // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. – Вып. 69 – Днепропетровск : ПГАСА, 2013. – С. 231–236.
13. Колохов В. В. Некоторые аспекты применения методов неразрушающего контроля свойств бетона / В. В. Колохов // *Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian Transactions (conference)*. – Warsaw, 2012. – Vol. 20. – С. 443–448.

### REFERENCES

1. Kolokhov V., Sopilniak A., Gasii G. and Kolokhov A. Structure materialphysic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7, no. 4.8, pp. 74–78.
2. Mori K., Spagnoli A., Murakami Y., Kondo G. and Torigoe I. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete. *NDT and E International*, 2002, vol. 35, iss. 6, pp. 399–406.



3. Schabowicz K. Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, vol. 14, iss. 2. pp. 295–303.
4. Chen Jun, Zheng Xu, Yue Yu and Yangping Yao. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques. NTD and E International. Editor-in-chief D. E. Chimenti, 2014, vol. 67, pp. 10–16.
5. Hassan A.M.T. and Jones S. W. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPC). A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. Construction and Building Materials, 2012, vol. 35, pp. 361–367.
6. Ari Hoda, Nazarian Soheil and Yuan Deren. Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures. Construction and Building Materials, 2014, vol. 71, pp. 384–391.
7. Warnemuende K. and Wu Hwai-Chung. Actively modulated acoustic nondestructive evaluation of concrete. Cement and Concrete Research, 2004, vol. 34, pp. 563–570.
8. Vynogradskyi V.M., Tkachenko H.H., Nepomniashchiy A.N. and Portasova A.D. *Harakter izmeneniya svoystv betonov pri odnostoronem zamorazhivaniy izdelij* [The nature of changes in the properties of concrete with one-sided freezing products]. *Ekspluatatsiya ta rekonstrukciya budivel' i sporud: tezi dop. II Mizhnar. konf.* [Exploitation and reconstruction of buildings and structures. Abstracts of the 2nd International Conference]. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa: ODABA, 2017, pp. 21–24. (in Russian).
9. *Betoni. Ul'trazvukoviy metod viznachenniya mitsnosti : DSTU B V.2.7-226:2009* [Concrets. Ultrasonic method for determining strength: DSTU B V.2.7-226: 2009]. Effective from 2010-09-01, Kyiv: DP Ukrarahbudinform, 2010, 27 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
10. *Izmeritel' prochnosti betona i strojmaterialov Novotest IPSM* [Measurement of strength of concrete and building materials Novotest IPSM]. *Novotest. Pribory kontrolya i kachestva* [Novotest. Control and quality devices: catalog]. Scientific and industrial center "Industrial equipment and technologies", Novomoskovsk, 2012, 26 p. (in Russian).
11. *Novotest. Rukovodstvo po `ekspluatatsii. Izmeritel' prochnosti Novotest IPSM* [Novotest. Operating manual. Novotest IPSM]. SLR Scientific-Technical Center "Industrial Equipment and Technologies", Novomoskovsk, 2012, 37 p. (in Russian).
12. Kolokhov V.V. *Formalizatsiya procedury opredeleniya fiziko-mehaniicheskikh svoystv betona i ee apparaturnoe obespechenie* [Formalization of the procedure for determining the physico-mechanical properties of concrete and its hardware]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Engineering]. vol. 69, Dnepropetrovsk, PSACEA, 2013, pp. 231–236. (in Russian).
13. Kolokhov V.V. *Nekotorye aspekty primeneniya metodov nerazrushayuscheho kontrolya svoystv betona* [Some aspects of the application of methods for non-destructive testing of concrete properties]. Theoretical Foundations of Civil Engineering. Polish–Ukrainian Transactions (conference). Warsaw, 2012, vol. 20, pp. 443–448. (in Russian).

Надійшла до редакції 24.01.2019 р.

УДК 697.133

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.58.406

## ЗНИЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ПІД ЧАС БУДІВНИЦТВА ГАЕС

ТИМОШЕНКО О. А.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

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

ТИМОШЕНКО Л. О.<sup>3</sup>, м. н. с.,

КОЛОХОВ О. В.<sup>4</sup>, студ.

<sup>1\*</sup> Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел.+38 (050) 452-43-63, e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

<sup>2</sup> Кафедра технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(050) 362-26-94, e-mail: [kolokhovdnepr@i.ua](mailto:kolokhovdnepr@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

<sup>3</sup> Кафедра архітектури, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(095) 329-14-54, e-mail: [lbvtimoshenko@gmail.com](mailto:lbvtimoshenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0928-0945

<sup>4</sup> Кафедра технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(050) 206-90-48, e-mail: [kolokhov@gmail.com](mailto:kolokhov@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6353-4363

**Анотація. Постановка проблеми.** Енергію в Україні виробляє велика кількість генерувальних електростанцій різних типів. Але, незважаючи на значні екологічні переваги, використання нетрадиційних джерел енергії саме по собі не вирішує головної проблеми – забезпечення електрикою користувачів у необхідному обсязі та в необхідний час. Нерівномірність споживання електроенергії в межах доби потребує наявності резервних та регульовальних потужностей, які б давали змогу задовольняти пікові потреби промисловості та суспільства. Генерацію енергії в режимі «на запит» можуть здійснювати лише гідро-(ГЕС), гідроакмулювальні (ГАЕС), які в той же час мають значний вплив на навколишнє середовище. **Мета статті** полягає у визначенні можливості проектування та будівництва ГАЕС зі зниженням навантаження на навколишнє середовище. **Виклад матеріалу.** Вирішення проблеми нерівномірності споживання електричної енергії потребує застосування регульовальних потужностей ГАЕС, як найбільш мобільних. Вартість будівництва ГАЕС великою мірою визначається їх місцем розташування, наближенням до споживачів електроенергії та необхідністю компенсації екологічних ризиків. Зниження навантаження на навколишнє середовище може бути досягнуте разі комплексного врахування екологічних потреб різних галузей економіки. На прикладі Рибальського кар'єру, розташованого у м. Дніпро, доведено доцільність розміщення на його території басейну ГАЕС. Розрахунок можливої потужності ГАЕС буде виконано під час оптимізаційних розрахунків, для яких сформульовано граничні умови. **Висновки.** Аналіз можливостей зниження впливу ГАЕС на навколишнє середовище показав, що існує можливість будівництва ГАЕС, які б не додавали екологічних ризиків. Визначено місце для можливого будівництва такої станції та сформульовано задачу оптимізації для визначення її потужності. Орієнтовна окупність проекту складає п'ять років.

**Ключові слова:** гідроакмулювальна електростанція; Рибальський кар'єр; проектна потужність; гідроагрегат

## СНИЖЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГАЭС

ТИМОШЕНКО Е. А.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

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

ТИМОШЕНКО Л. А.<sup>3</sup>, м. н. с.

КОЛОХОВ А. В.<sup>4</sup>, студ.

<sup>1\*</sup> Кафедра экологии и охраны окружающей среды, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел.+38 (050) 452-43-63, e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

<sup>2</sup> Кафедра технологиестроительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38(050) 362-26-94, e-mail: [kolokhovdnepr@i.ua](mailto:kolokhovdnepr@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

<sup>3</sup> Кафедра архитектуры, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38(095) 329-14-54, e-mail: [lbvtimoshenko@gmail.com](mailto:lbvtimoshenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0928-0945

<sup>4</sup> Кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38(050) 206-90-48, e-mail: [kolokhov@gmail.com](mailto:kolokhov@gmail.com), ORCID ID:0000-0002-6353-4363

**Аннотация. Постановка проблемы.** Энергия в Украине производится большим количеством генерирующих электростанций различных типов. Но, несмотря на значительные экологические преимущества, использование нетрадиционных источников энергии само по себе не решает главной проблемы - обеспечения электричеством пользователей в необходимом объеме и в нужное время. Неравномерность потребления электроэнергии в пределах суток требует наличия резервных и регулирующих мощностей, которые позволяли удовлетворять пиковые потребности промышленности и общества. Генерацию энергии в режиме «по запросу» могут осуществлять только гидро-и гидроаккумулирующие электростанции, которые в то же время оказывают значительное влияние на окружающую среду. **Цель статьи** заключается в определении возможности проектирования и строительства ГАЭС со снижением нагрузки на окружающую среду. **Изложение материала.** Решение проблемы неравномерности потребления электрической энергии требует применения регулирующих мощностей ГАЭС как наиболее мобильных. Стоимость строительства ГАЭС в значительной степени определяется их местоположением, приближением к потребителям электроэнергии и необходимостью компенсации экологических рисков. Снижение нагрузки на окружающую среду может быть достигнуто при комплексном учете экологических потребностей различных отраслей экономики. На примере Рыбальского карьера, расположенного в г. Днiпро, приведены целесообразность размещения на его территории бассейна ГАЭС. Расчет возможной мощности ГАЭС будет определен при оптимизационных расчетах, для которых сформулированы граничные условия. **Выводы.** Анализ возможностей снижения воздействия на окружающую среду при строительстве ГАЭС показал, что существует возможность строительства ГАЭС, которые не добавляют экологических рисков. Определено место для возможного строительства такой станции и сформулирована задача оптимизации для определения ее мощности. Ориентировочная окупаемость проекта составляет пять лет.

**Ключевые слова:** гидроаккумулирующая электростанция; Рыбальский карьер; проектная мощность; гидроагрегат

## LOAD DECREASE ON THE ENVIRONMENT IN THE BUILDING OF PUMP STORAGE PLANT (PSP)

TYMOSHENKO O.A.<sup>1\*</sup>, *Cand., Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
KOLOKHOV V.V.<sup>2</sup>, *Cand., Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
TYMOSHENKO L.O.<sup>3</sup>, *Junior Researcher*,  
KOLOKHOV O.V.<sup>4</sup>, *Student*

<sup>1\*</sup> Department of Ecology and Environmental Protection, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-05, e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

<sup>2</sup> Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(050) 362-26-94, e-mail: [kolokhovdnepr@i.ua](mailto:kolokhovdnepr@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

<sup>3</sup> Department of Architecture, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(095) 329-14-54, e-mail: [lbvtimoshenko@gmail.com](mailto:lbvtimoshenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0928-0945

<sup>4</sup> Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 206-90-48, e-mail: [kolokhov@gmail.com](mailto:kolokhov@gmail.com), ORCID ID:0000-0002-6353-4363

**Abstract. Problem statement.** Energy in Ukraine is produced by a large number of generating power plants of various types. But, despite the significant environmental benefits, the use of unconventional energy sources does not solve the main problem - providing electricity to consumers with the required amount and at the right time. The unevenness of electricity consumption in the course of the day requires the availability of reserve and regulatory capacities that would meet the peak needs of industry and society. Generation of energy in the "on-demand" mode can only be performed by hydro (HES), pump storage plants (PSP), which at the same time have a significant impact on the environment. **The purpose of the article** is to determine the possibility of designing and construction of a PSP with a reduction of the load on the environment. **The presentation material.** Solving the problem of uneven electricity consumption requires the use of regulatory capacity of PSP, which are the most mobile ones. The cost of construction of the PSP is largely determined by their location, approaching electricity consumers and the need to compensate for environmental risks. Reducing the load on the environment can be achieved with a comprehensive consideration of the environmental needs of various sectors of the economy. As the example of Rybalskyi quarry, located in the city of Dnipro, it is the expediency of placing on its territory the PSP. The calculation of the potential capacity of the PSP will be determined by optimization calculations, for which the boundary conditions are formulated. **Conclusions.** The analysis of the possibilities of reducing the impact on the environment during the construction of the PSP has shown

that there is a possibility of the construction of the PSP without any environmental risks. A place has been determined for the possible construction of such a PSP and an optimization task has been formulated to determine its power. The estimated payback period of the design project is five years.

**Keywords:** *pumped storage power station; Rybalsky quarry; project capacity; hydraulic unit*

**Постановка проблеми.** Енергію в Україні виробляє велика кількість генерувальних електростанцій різних типів: теплові (ТЕС), атомні (АЕС), гідро-(ГЕС), гідроакумулювальні (ГАЕС), вітрові (ВЕС) та сонячні (СЕС). Генерація здійснюється за допомогою значної кількості допоміжних споруд (склади палива, технологічні водойми-охолоджувачі, шлако- та золовідвали, сховища радіоактивних відходів та ін.). Окрім цього до складу системи електроенергетики України входить складна організаційно-технічна система розподілення енергії (лінії електропередач, трансформаторні підстанції тощо) розосереджені по території, що функціонують у безперервно змінних умовах природного середовища.

Викиди ТЕС інтенсивно забруднюють атмосферну вологу й опади через розчинення в них окислів сірки й азоту; а також ґрунти, рослинність – випаданням на них пилу, забрудненого дощу та снігу; а поверхню вод – осадженням водних об'єктах шкідливих речовин та через змив їх у річки й водойми дощовими потоками. Наслідком такого забруднення земної поверхні стає закиснення сільськогосподарських земель та накопичення у ґрунтах важких металів із вугільного попелу, що пригнічує розвиток лісових біоценозів, знижує урожайність сільськогосподарських культур і забруднює небезпечними для людини сполуками продукти харчування.

Зростання масштабів використання електричної енергії, загострення проблем охорони навколишнього середовища значно активізували пошуки екологічно чистіших способів вироблення електричної енергії. Інтенсивно розробляються способи використання непаливної відновлюваної енергії – сонячної, вітрової, геотермальної, енергії хвиль, припливів і відпливів, енергії біогазу та ін. Джерела цих видів енергії – невичерпні, але потрібно розумно оцінити, чи зможуть вони задовольнити усі потреби людства.

Потенційні можливості використання нетрадиційних поновлюваних джерел енергії (сонця, вітру, біомаси тощо) на території України досить значні. За деякими оцінками, використання енергії з нетрадиційних джерел може надати до 1 800 млрд кВт/год електроенергії на рік. Але, не зважаючи на значні екологічні переваги, використання нетрадиційних джерел енергії саме по собі не вирішує головної проблеми – забезпечення електрикою користувачів у необхідному обсязі та в необхідний час.

Нерівномірність споживання електроенергії в межах доби потребує наявності резервних та регульовальних потужностей, які б давали змогу задовольняти пікові потреби промисловості та суспільства. Генерацію енергії в режимі «на запит» можуть здійснювати лише ГЕС та ГАЕС. Інші постачальники мають обмеження, або технологічні для ТЕС та АЕС (функціонування цих електростанцій можливе лише у режимі постійної генерації на одному рівні потужності), або природні для ВЕС (наявність вітру достатньої сили) та СЕС (наявність світла) [1; 2].

Якщо додаткові потреби від базового рівня споживання покриває ГЕС, то «зайву» енергію (за потреби для постачальників нижче базового рівня) необхідно або передати в інший регіон, або акумулювати. Найпростіший спосіб акумуляції – використання ГАЕС. Зростання виробництва електроенергії в Україні супроводжується перерозподілом часток у загальному балансі виробництва, що припадає на окремі типи електростанцій. Так, при загальному рості виробництва електроенергії у січні - червні 2018 р. на 1,95 % порівняно із січнем - червнем 2017 р. виробництво електрики на ГЕС та ГАЕС збільшилось на 32,1 % та склало 9,8 % у загальному балансі (за той же термін 2017 р. -7,6 %) [11].

Тобто збільшення виробництв енергії на ГАЕС доцільне, але воно потребує будівництва нових станцій, що

супроводжується обмеженнями екологічного характеру (будівництво накопичувальних водойм виводить із користування значні обсяги земель та змінює природні умови навкруги). Тому спорудження нових ГАЕС зі зменшенням впливу на навколишнє середовище стає актуальним завданням.

**Мега статті** полягає у визначенні можливості проектування та будівництва ГАЕС зі зниженням навантаження на навколишнє середовище.

**Виклад матеріалу.** Світовий досвід використання ГАЕС в енергосистемах показує, що електростанції цього типу можна розміщувати: поблизу місць найбільшого енергоспоживання (тобто біля промислових підприємств та в містах); поряд із великими потужностями, щогенерують електрику на значній відстані від потужностей, що виробляють або та споживають електроенергію. Кожний варіант розміщення ГАЕС має свої специфічні переваги: забезпечення безперервності роботи споживачів, підвищення надійності роботи системи генерації електроенергії, функції регулювання загальносистемних характеристик (забезпечення необхідних значень частоти і напруги) [6].

Найбільш вдалим вважається досвід будівництва ГАЕС, що розміщуються поблизу АЕС, або дві станції будуються в єдиному комплексі. В Україні, наприклад, це Південноукраїнський енергетичний комплекс (ПУЕК), що використовує ядерні (працюють у постійному режимі) і водні ресурси р. Південний Буг (маневровий режим). Проектна потужність комплексу складає 6 243,5 МВт (з яких потужністю АЕС 4 000 МВт). На цей час потужність комплексу складає 3 000 МВт АЕС та 302 МВт ГАЕС (рис.1).

Нині реалізація проекту натикається на значні заперечення екологів, оскільки збільшення водосховищ суттєво впливає на навколишнє середовище. Тому, наприклад, будівництво Костянтинівської ГЕС–ГАЕС (як складової ПУЕК) із Костянтинівським водосховищем припинене.

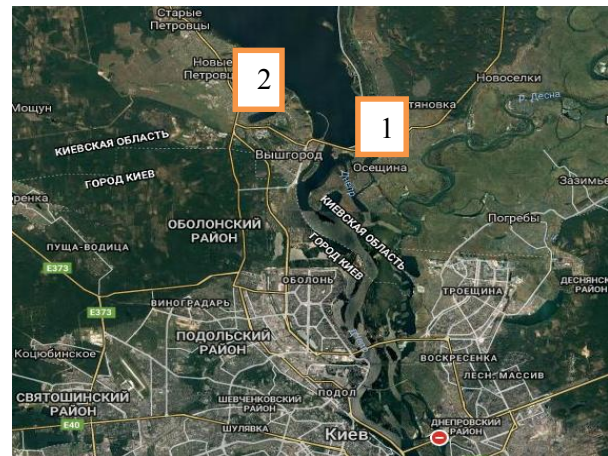
Інший приклад розташування ГАЕС – Київська ГАЕС, що розташована на відстані 10 км від меж Києва та входить (сумісно з

Київською ГЕС) до складу гідроенергетичного комплексу (рис. 2). Робота цього комплексу дозволяє вирівнювати пікове навантаження в столиці.



*Рис. 1. Південноукраїнський енергетичний комплекс у складі : Південноукраїнської АЕС (1), Ташилицької ГАЕС (2) / Fig. 1. The South-Ukrainian power complex consisting of the South-Ukrainian NPP (1), Tashlykaya HPP (2)*

Штучно створена верхня водойма корисною ємністю у 3,7 млн м<sup>3</sup> займає значну площу та являє собою джерело можливої загрози, оскільки розташована на висоті 70 м над рівнем водосховища Київської ГЕС.



*Рис. 2. Гідроенергетичний комплекс Київських ГЕС та ГАЕС у складі : ГЕС (1), ГАЕС (2) / Fig. 2. The hydropower complex of the Kyiv Hydroelectric Power Plant and the HPSS consists of the HES (1), the HPSS (2)*

Третій тип розташування демонструє Дністровська ГАЕС на річці Дністер. Ця станція функціонує як складова Дністровського каскаду, реалізованого у річковому басейні Дністра з двох ГЕС та

однієї ГАЕС (рис. 3).



Рис. 3. Дністровський каскад у складі : Дністровської ГЕС-1 (1), Дністровської ГАЕС (2) та Дністровської ГЕС-2 (3) / Fig. 3. Dniester cascade comprising: Dniester HPS-1 (1), Dniester HPSP (2) and Dniester HPS-2 (3)

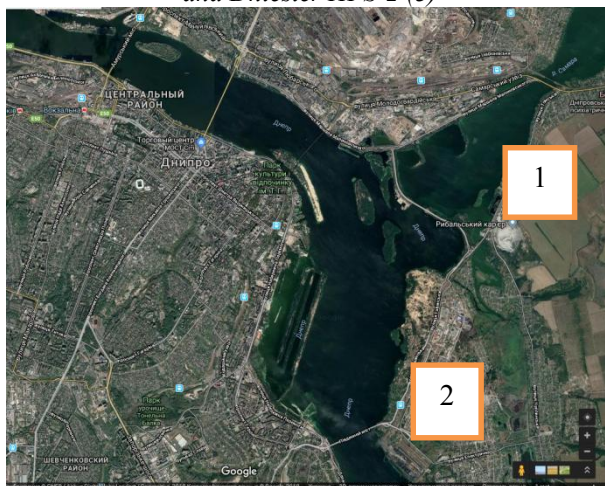


Рис. 4. Рибальський кар'єр (1) на мапі м. Дніпро та Придніпровська ТЕС (2) / Fig. 4. Fishery Quarry (1) on the map of the city of Dnipro and Pridniprovsk TPP (2)

Дністровський комплекс уже зараз має унікальну можливість регулювання параметрів енергосистеми України. На сьогодні сумарна потужність станцій становить 1115 МВт. Планується, що четвертий гідроагрегат ГАЕС стане до роботи в I кварталі 2019 року. Після добудови встановлена електрична потужність Дністровської ГАЕС (7 насосів-турбін) має складати 2268 МВт у генерувальному режимі та 2947 МВт у насосному режимі. Така потужність виводить станцію на перше місце у Європі та у шістку найпотужніших ГАЕС у світі. Але й у цьому випадку до проекту є багато зауважень від екологів.

Аналіз недоліків та переваг ГАЕС, що надають різні джерела, з нашої точки зору, переконує в необхідності розвитку потужностей ГАЕС, але з мінімізуванням впливу на навколишнє середовище. Такої начебто дуже суперечливої мети можна досягти, ліквідуючи під час будівництва ГАЕС джерела негативного навантаження на навколишнє середовище.

Одні з таких джерел - кар'єри з видобутку будівельних матеріалів. За ступенем впливу вони майже найбільш несприятливі негативні чинники на довкілля. Історично склалось, що кар'єри розташовувались поблизу міст, оскільки вартість транспортування сировини значна.

На мапі м. Дніпро (рис. 4) помітна зона Рибальського кар'єру, де видобувають гранітний щебінь із 1932 року. Кар'єр розташований поблизу річки. Його глибина на сьогодні складає понад 80 м від поверхні, а територія виробленого простору становить близько 40 га.

Зазвичай один із двох басейнів ГАЕС розташовують вище річки, яка й виконує роль другого басейну. Значні кошти витрачаються на будівництво цієї гідротехнічної споруди. У разі використання Рибальського кар'єру як нижнього басейну на цих витратах можна заощадити.

Європейський досвід показує доцільність будівництва ЕС, коли вартість коштів, витрачених на спорудження одного кіловата нових генерувальних потужностей, не перевищує 2000 євро. Використання особливостей місцевості (на прикладі будівництва Дністровської ГАЕС) може знизити вартість будівництва утричі. Але й у цьому випадку передбачається багато земляних робіт. Як що у разі використання Рибальського кар'єру як нижнього басейну ГАЕС обсяг таких робіт буде дуже незначний, то вартість будівництва буде ще нижча. Враховуючи наявність розгалуженої мережі енергопостачання та наявність у межах міста значних генерувальних потужностей (Придніпровська ТЕС), привабливість будівництва ГАЕС на базі Рибальського кар'єру зростає. Потужність майбутньої ГАЕС можна визначити, порівнявши її з існуючою Київською ГАЕС.

Об'єм ковша Київської станції складає 7 млн м<sup>3</sup>.

Об'єм Рибальського кар'єру - 14 млн м<sup>3</sup>.

Верхня водойма Київської ГАЕС розташована над рівнем водосховища Київської ГЕС на 70 м.

Глибина Рибальського кар'єру – 80 м від рівня р. Дніпро.

Площа дзеркала верхньої водойми Київської ГАЕС перевищує площу водойми на базі Рибальського кар'єру більше ніж удвічі.

Середньорічне виробництво Київської ГАЕС — до 200 млн кВт-г.

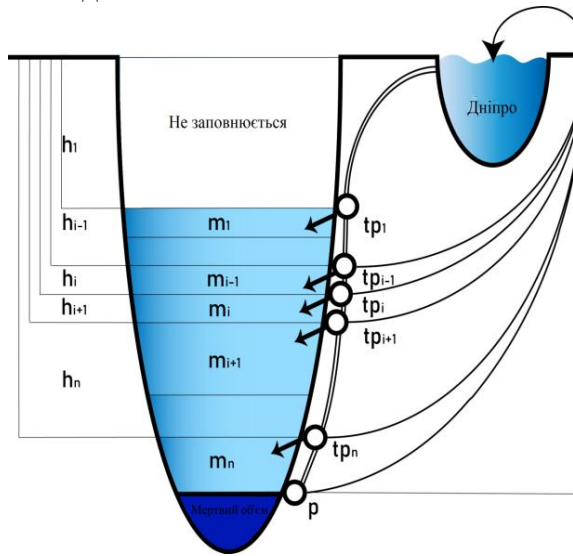


Рис. 5. Схема до розрахунку оптимальної кількості гідроагрегатів Дніпровської ГАЕС із використанням Рибальського кар'єру як нижнього басейну:  
*P* – насосний агрегат; *tp* – гідроагрегат;  
*h* – висота від поверхні кар'єру до гідроагрегата;  
*m* – маса води / Fig. 5. Scheme to calculate the optimal number of hydro units of the Dnipro HPS using the Fisherman's Quarry as a Lower Basin:  
*P* – pump unit; *tp* – hydro unit;  
*h* – height from the surface of the quarry to the hydroelectric unit; *m* – the mass of water

У разі забезпечення виробництва енергії Дніпровською ГАЕС на рівні Київської ГАЕС окупність проекту становитиме приблизно п'ять років.

Однак для визначення оптимальної потужності Дніпровської ГАЕС необхідно з'ясувати кількість та межі розташування гідроагрегатів майбутньої станції, оскільки схема роботи ГАЕС буде відрізнятися від звичайної. Оптимальну кількість гідроагрегатів для максимального виробітку енергії можна визначити з розрахунку за схемою на на рисунку 5, застосовуючи наведені нижче рівняння:

$$\sum_{i=1}^n m_i g h_i \rightarrow \max ;$$

$$\sum_{i=1}^n m_i g h'_i \rightarrow \min .$$

$$n \rightarrow \min$$

Розробляючи робочий проект будівництва ГАЕС, необхідно врахувати також ефект від поліпшення екологічної ситуації навколо Рибальського кар'єру та створення додаткових робочих місць.

**Висновки.** Аналіз можливостей зниження впливу на навколишнє середовище у разі будівництва ГАЕС показав, що:

- існує можливість побудови ГАЕС, які б не додавали екологічних ризиків;
- визначено місце для можливого спорудження такої ГАЕС;
- сформульовано задачу оптимізації для визначення потужності такої ГАЕС;
- орієнтовна окупність проекту складає п'ять років.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ландау Ю. А. Гидроэнергетика и окружающая среда : монография / Ю. А. Ландау. – Киев : Либра, 2004. – 167 с.
2. Бабури́н Б. Л. Гидроаккумулирующие электростанции : монография / Б. Л. Бабури́н. – Москва : Энергия, 2008. – 98 с.
3. Серебряников Н. И. Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС : монография / Н. И. Серебряников. – Москва : Изд-во НИЦ ЭНАС, 2000. – 54 с.
4. Субботин А. С. Гидротехника и мелиорация / А. С. Субботин, В. А. Хаустов [Електронний ресурс]. — Режим доступу : [http://hva.rshu.ru/ob/gidroteh/uch/3/chapter17/3\\_17\\_1.htm](http://hva.rshu.ru/ob/gidroteh/uch/3/chapter17/3_17_1.htm)
5. Безруких П. П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / П. П. Безруких, Д. С. Стребков // Малая энергетика. – 2005. – № 1–2. – С. 14–23.
6. Елистратов В. В. Гидравлическое аккумулирование энергии возобновляемых источников / В. В. Елистратов // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 10. – С. 35–40.

7. Кириленко О. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / О. В. Кириленко, А. В. Праховник // Праці Інституту електродинаміки. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 10–16.
8. Acharya N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network / N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulanathan // Electric Power and Energy Systems. – 2006. – Vol. 28. – Pp. 669–678.
9. Dolezal J. The effect of dispersed generation on power quality in distribution system / J. Dolezal, P. Sautarius., J. Tlustý // Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. CIGRE / IEEE PES International Symposium. – 2003. – Pp. 204–207.
10. Кириленко О. В. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О. В. Кириленко, Ю. С. Петергеря, Т. О. Терещенко, В. Я. Жуйков. – Київ : Медіа ПРЕС, 2005. – 211 с.

## REFERENCES

1. Landau Yu. A. *Gidro`energetika i okruzhayushaya sreda* [Hydropower and the environment]. Kyiv : Libra, 2004, 167 p. (in Russian).
2. Baburin B. L. *Gidroakkumuliruyushie `elektrostantsii* [Pumped Storage Power Plants]. Moscow : Energy, 2008, 98 p. (in Russian).
3. Serebryanikov N. I. *Gidroakkumuliruyushie `elektrostantsii. Stroitel'stvo i `ekspluatatsiya Zagorskoj GAES* [Pumped storage power plants. Construction and operation of Zagorskaya PSP]. Moscow : SC ENAS Publ., 2000, 54 p. (in Russian).
4. Subbotin A. S. and Khaustov V. A. *Gidrotehnika i melioratsiya* [Hydrotechnics and Land Reclamation]. Electronic resource. (in Russian).
5. Bezrukih P. P. and Strebkov D. S. *Sostoyaniye, perspektivy i problemy razvitiya vozobnovlyayemykh istochnikov `energii* [State, prospects and problems of development of renewable energy sources]. *Malaya `energetika* [Low energy]. 2005, no. 1–2, pp. 14–23. (in Russian).
6. Yelistratov V. V. *Gidravlichesкое аккумуляирование `energii vozobnovlyayemykh istochnikov* [Hydraulic energy storage of renewable sources]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic engineering]. 2006, no. 10, pp. 35–40. (in Russian).
7. Kirilenko O. V. and Prakhovnik A. V. *Energetika stalogo rozvittku: vikliki ta shlyahi pobudovi* [Sustainable Energy: Challenges and Construction]. *Praci Institutu elektrodinamiki. Special'nij vipusk* [Works of the Institute of Electrodynamics. Special issue]. 2010, pp. 10–16. (in Ukrainian).
8. Acharya N., Mahat P. and Mithulanathan N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network. *Electric Power and Energy Systems*, 2006, vol. 28, pp. 669–678.
9. Dolezal J., Sautarius P. And Tlustý J. The effect of dispersed generation on power quality in distribution system. *Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. CIGRE/IEEE PES International Symposium*, 2003, pp. 204–207.
10. Kyrylenko O. V., Petergerya Yu. S., Tereshchenko and Zhuykov V. Ya. *Intelektual'ni systemy keruvannya potokamy elektroenerhiyi u lokal'nykh ob'yecktakh* [Intelligent power flow control systems in local objects]. Kyiv : Media PRES, 2005, 211 c. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 23.01.2019 р.



УДК 692.542.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.65.407

## ОПТИМАЛЬНИЙ ПІДБІР ПЛАСТИФІКАТОРА ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

ГАННИК М. І.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
МАРТИШ О. П.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ГАЙДАР А. М.<sup>3\*</sup>, ст. викл.,  
БЕРЕЗЬЮК А. М.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, проф.,  
ПАПІРНИК Р. Б.<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [gannik50@mail.ru](mailto:gannik50@mail.ru), ORCID ID: 000 0062 3278 9232

<sup>2</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [martysh55@mail.ru](mailto:martysh55@mail.ru), ORCID ID: 0000 0002 6126 1920

<sup>3\*</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [nastuel\\_gaidar@ukr.net](mailto:nastuel_gaidar@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-8993-1458

<sup>4</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [berezuk@mail.pgasa.dp.ua](mailto:berezuk@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

<sup>5</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [prb@mail.pgasa.dp.ua](mailto:prb@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

**Аногація. Мета.** Дослідити оптимальний підбір пластифікатора для асфальтобетонного покриття. Крихкість асфальтобетону, яка виникає в результаті старіння, дії сонячних променів, перепаду температур не завжди дозволяє його використовувати повторно без пластифікаторів, які можуть впливати на інтенсивність міжмолекулярної взаємодії і, відповідно на властивості асфальтобетону, створюють систему еластичною. Вибір пластифікаторів в процесі лабораторних досліджень проводився в залежності від природніх якостей бітумів і пластифікаторів. **Методика.** Порівняння залежностей температур крихкості і міцності від швидкості деформування. **Результати.** Встановлено залежності температури крихкості і міцності від швидкості деформування. В процесі експериментів записували на міліметровому папері діаграму навантажень – прогин за допомогою індуктивного датчика, підключеного до випробувальної машини ЦД-10 через посилювач, який дозволяє збільшувати фактичний прогин в 1 000 разів. **Наукова новизна.** Дослідження асфальтобетону на вигин в широкому інтервалі температур и швидкості деформування дозволили визначити температуру крихкості асфальтобетону після термостаріння. **Практична значимість.** Таким чином, запропонований спосіб відновлення монолітності асфальтобетону в покритті шляхом введення оптимальної кількості пластифікатора (мастила). Встановлена залежність температури крихкості напруженого асфальтобетону від швидкості деформації в інтервалі 15...544 мм/хв. за температурою від +50 до –20 °С дозволяє розрахувати їх  $T_{кр}$  при будь-якій швидкості згинання за даними, отриманими експериментально при двох значеннях швидкості згинання. Різниця у величині  $T_{кр}$  окремих асфальтобетонів у вказаному інтервалі швидкостей згинання досягає 30 °С.

**Ключові слова:** асфальтобетон; крихкість; міцність; деформаційна температура

## ОПТИМАЛЬНИЙ ПОДБОР ПЛАСТИФИКАТОРА ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ

ГАННИК Н. И.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
МАРТЫШ А. П.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ГАЙДАР А. М.<sup>3\*</sup>, ст. препод.,  
БЕРЕЗЬЮК А. Н.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, проф.,  
ПАПИРНИК Р.Б.<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра технологии строительного производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [gannik50@mail.ru](mailto:gannik50@mail.ru), ORCID ID: 000 0062 3278 9232

<sup>2</sup> Кафедра технологии строительного производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [martysh55@mail.ru](mailto:martysh55@mail.ru), ORCID ID: 0000 0002 6126 1920

<sup>3\*</sup> Кафедра технологии строительного производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [nastuel\\_gaidar@ukr.net](mailto:nastuel_gaidar@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-8993-1458

<sup>4</sup> Кафедра технологии строительного производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [berezuk@mail.pgasa.dp.ua](mailto:berezuk@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

<sup>5</sup> Кафедра технологии строительного производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [prb@mail.pgasa.dp.ua](mailto:prb@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

**Аннотация. Постановка проблемы.** Необходимо исследовать оптимальный подбор пластификатора для асфальтобетонного покрытия. Хрупкость асфальтобетона, которая возникает в результате старения, воздействия солнечных лучей, перепада температур, не всегда позволяет его использовать повторно без пластификаторов, которые могут влиять на интенсивность межмолекулярного взаимодействия и, соответственно, на свойства асфальтобетона, делают систему эластичной. Выбор пластификаторов в процессе лабораторных исследований проводился в зависимости от природных качеств битумов и пластификаторов. **Методика.** Сравнение зависимостей температур хрупкости и прочности от скорости деформирования. **Результаты.** Установлена зависимость температуры хрупкости и прочности от скорости деформирования. В процессе экспериментов записывали на миллиметровой бумаге диаграмму нагрузок - прогиб с помощью индуктивного датчика, подключенного к испытательной машине СД-10 через усилитель, который позволяет увеличивать фактический прогиб в 1 000 раз. **Научная новизна.** Исследование асфальтобетона на изгиб в широком интервале температур и скорости деформирования позволило определить температуру хрупкости асфальтобетона после термостарения. **Практическая значимость.** Предложен способ восстановления монолитности асфальтобетона на покрытии путем введения оптимального количества пластификатора (смазки). Установленная зависимость температуры хрупкости напряженного асфальтобетона от скорости деформации в интервале 15...544 мм/мин. при температуре от +50 до -20 °С позволяет рассчитать их  $T_{кр}$  при любой скорости сгибания по данным, полученным экспериментально при двух значениях скорости сгибания. Разница в величине  $T_{кр}$  отдельных асфальтобетонов в указанном интервале скоростей сгибания достигает 30 °С.

**Ключевые слова:** асфальтобетон; хрупкость; прочность; деформационная температура

## OPTIMAL SELECTION OF A PLASTICIZER FOR ASPHALT-CONCRETE COATING

HANNYK M.I.<sup>1</sup>, *Cand., Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
MARTYSH O.P.<sup>2</sup>, *Cand., Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
HAIDAR A.M.<sup>3\*</sup>, *Senior Research Assistant*,  
BEREZUK A.M.<sup>4</sup>, *Cand., Sc. (Tech.), Prof.*,  
PAPIRNYK R.B.<sup>5</sup>, *Cand., Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Department of technology of building production, State Higher Educational Institution "Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [gannik50@mail.ru](mailto:gannik50@mail.ru), ORCID ID: 000 0062 3278 9232

<sup>2</sup> Department of technology of building production, State Higher Educational Institution "Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [martysh55@mail.ru](mailto:martysh55@mail.ru), ORCID ID: 0000 0002 6126 1920

<sup>3\*</sup> Department of technology of building production, State Higher Educational Institution "Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [nastuel\\_gaidar@ukr.net](mailto:nastuel_gaidar@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-8993-1458

<sup>4</sup> Department of technology of building production, State Higher Educational Institution "Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [berezuk@mail.pgasa.dp.ua](mailto:berezuk@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

<sup>5</sup> Department of technology of building production, State Higher Educational Institution "Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0652) 47-02-98, e-mail: [prb@mail.pgasa.dp.ua](mailto:prb@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7153-9378

**Abstract. Purpose.** To investigate the optimal selection of plasticizer for asphalt concrete coatings. The fragility of asphalt concrete, which occurs as a result of aging, exposure to sunlight, temperature variations, does not always allow it to be reused without plasticizers, which can affect the intensity of intermolecular interaction and, accordingly, the properties of asphalt concrete, create a system of elasticity. The option of plasticizers in the course of laboratory studies was carried out in accordance with the natural qualities of bitumen and plasticizers. **Methods.** Comparison of the

brittleness and strength dependences on the deformation rate. **Results.** The dependence of the temperature of brittleness and strength on the deformation rate is established. In the course of experiments, on a millimeter paper, a load diagram was written – a deflection using an inductive sensor connected to the test drive CD-10 through an amplifier, which allows to increase the actual deflection by 1000 times. **Scientific novelty.** The study of asphalt concrete for bending over a wide range of temperatures and deformation rates allowed to determine the temperature of brittleness of asphalt concrete after thermal aging. **Practical relevance.** Thus, the proposed method for reducing the monolithicity of asphalt concrete in the coating by introducing the optimal amount of plasticizer (lubricant). The dependence of the temperature of brittleness of stressed asphalt concrete on the rate of deformation in the range of 15...544 mm/min is established. At temperatures from +50 to -20 °C it is possible to calculate their  $T_{br}$  at any rate of bending according to the data obtained experimentally at two values of the bending rate. The difference in the value of  $T_{br}$  of individual asphalt concrete in the specified range of bending rates reaches 30 °C.

**Keywords:** asphalt concrete; fragility; strength; deformation temperature

**Постановка проблеми.** Згідно з технологічною послідовністю відновлення монолітності верхнього шару покриття автомобільної дороги зводиться, як правило, до розігріву асфальтобетону (газовими або емпіричними пальниками інфрачервоного випромінювання), його розпушування, розливання пластифікатора за необхідності, підкінець, ущільнення [1].

**Мета** - дослідити оптимальний підбір пластифікатора для асфальтобетонного покриття.

Крихкість асфальтобетону, яка виникає в результаті старіння, дії сонячних променів, перепаду температур, не завжди дозволяє його використовувати повторно без пластифікаторів, які можуть впливати на інтенсивність міжмолекулярної взаємодії і, відповідно, на властивості асфальтобетону, роблять систему еластичною.

Вибір пластифікаторів у процесі лабораторних досліджень проводився залежно від природи якостей бітумів і пластифікаторів.

Ураховувалося, що при пластифікації матеріалів у фізико-хімічному відношенні повинні бути подібні для забезпечення однорідності і стійкості структури в'язучого.

При цьому висувалися вимоги доступності (в плані вартості і наявності) пластифікаторів. Виходячи із вищесказаного, як пластифікатор було вибрано відпрацьоване мастило (відходи автомобільних підприємств). Прийняті для дослідження асфальтобетонні суміші (див. табл.) різнилися за кількістю пластифікатора.

**Матеріал.** Суміш № 1 (вихідний матеріал) дрібнозерниста з гранулометриєю типу В складена із гранітного щебеню розмірами 5...10 мм, гранітних висівок і бітуму БНД-85 в кількості 6 % вагових часток.

Суміш № 2 – теж саме, що і № 1, але піддавалася термообробці протягом 8,5 год за 200 °C.

Суміші № 3, 4, 5 являють собою суміш № 2, яка пластифікована з 0,33; 0,67 і 1 % відпрацьованого мастила понад 100 % за ваговими характеристиками від кількості суміші. Як видно з таблиці, всі властивості асфальтобетонів відповідають вимогам держстандартів. Відповідно, стандартні дослідження не можуть виявити особливостей бетонів при їх пластифікації. У зв'язку із цим попередня серія дослідів полягала у визначенні міцності і деформативності асфальтобетону складу № 1 при згинанні навантаженням, прикладеним у середині прольоту (14 см) в широкому інтервалі швидкостей деформування і температур. Досліди проводили на випробувальній машині ЦД-10.

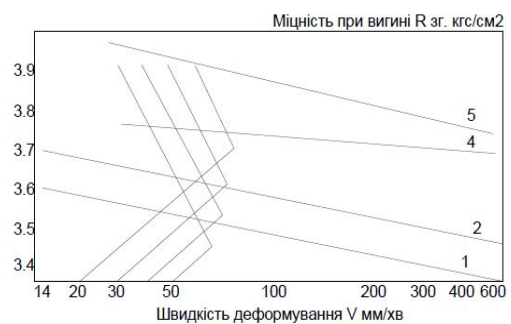


Рис. 1. Залежність температури крихкості та міцності асфальтобетону від швидкості деформування: 1, 2, 3, 4, 5 - номери складу асфальтобетону; 15, 55, 235, 544 - швидкість

деформування, мм/хв / Fig. 1. Dependence of the temperature of fragility and durability of asphalt concrete on the rate of deformation: 1, 2, 3, 4, 5 numbers of asphalt concrete composition; 15, 55, 235, 544 deformation rate, mm / min

**Методика та результати.** Графік, який показує залежність міцності при згинанні балочок розміром 4×4×16 см від температури за даної швидкості деформування, має явно виражений

максимум, якому відповідає температура крихкості асфальтобетону (рис. 1).

Зменшення міцності за зниження температури пов'язане з проявом крихкості, коли асфальтобетон переходить упружнокрихкий стан [2; 3]. Експерименти показали, що  $T_{кр}$  залежить від швидкості деформування, наприклад, із 15 до 544 мм/хв, зміщується від 0 до +15 °С.

Таблиця

**Фізико-механічні властивості асфальтобетонних сумішей**

Показники	Номер складу асфальтобетонної суміші				
	1	2	3	4	5
Залишкова пористість	4,50	4,90	4,10	3,30	2,90
Об'ємна вага, г/см <sup>3</sup>	2,33	2,32	2,33	2,33	2,33
Водонасиченість, % об'єму	3,80	4,50	3,00	2,80	1,50
Набухання, % об'єму	0,47	0,30	0,23	0,30	0,30
Міцність при стисненні, кгс/см <sup>2</sup> , при t <sup>0</sup> = 20 °С					
R <sub>20</sub>	82,8	105,5	87,9	64,00	60,70
R <sub>6</sub>	70,8	98,2	83,4	65,00	55,70
R <sub>BD</sub>	50,0	76,8	61,0	47,80	48,70
50 °С	15,9	31,3	21,7	18,30	13,90
0 °С	155,8	172,4	187,4	118,20	105,30
Коефіцієнт водостійкості:					
$\frac{R_B}{R_{20}}$	0,87	0,93	0,94	1,00	0,92
	0,60	0,73	0,70	0,75	0,50
Міцність затривісного стиснення за 50 °С і бокового тиску, 1 кгс/см <sup>2</sup>	22,4	34,9	–	26,0	23,4
4 кгс/см <sup>2</sup>	33,3	44,2	–	49,8	39,0

На графіку показано температурну межу переходу асфальтобетону із пружно в'язкопластичного стану в пружнокрихкий.

Пружнов'язкопластичний стан із збільшенням швидкості деформування міцності бетону росте по знайомій залежності, запропонованій М. А. Івановим.

У пружнокрихкому стані із збільшенням швидкості деформування міцність зменшується, що пов'язано із крихким руйнуванням асфальтобетону, яке настає у випадку, якщо тривалість дії сили  $t$  менша або дорівнює  $\tau$ .

За температури, відповідної  $T_{кр}$ . бітумомінерального матеріалу [4-9]:

$$t = \tau. \tag{1}$$

Час релаксації, згідно з Александровим, Туревичем, Лазуркіним, визначається залежністю [10]:

$$\tau = \tau_0 e_{кр} \frac{U_0 - a\sigma}{R_T} \tag{2}$$

де  $\tau$  - період коливання кінетичної одиниці біля тимчасового положення рівноваги;  $U_0$  - енергія активації релаксаційного процесу;  $U_0 - a\sigma$  - теж, у напруженому матеріалі;  $a$  - структурний коефіцієнт;  $R$  - газова постійна;  $\sigma$  - постійна

напряга  $(\tau_0, U_0, a) \neq f(T; \sigma)$  [11];

$$t = \frac{C}{V}, \quad (3)$$

де  $C$  – постійна.

Після підставлення виразів (2) і (3) у формулу (1) отримуємо, що за температури, відповідної  $T_{кр}$ :

$$\frac{1}{T_{кр}} = (\lg V^* - \lg V) \frac{R}{(U_0 - a\sigma) \lg l} > \frac{1}{T}, \quad (4)$$

де  $V^* = 1/\tau_0$ ;  $T_{кр}$ , К - потрібна величина температури крихкості асфальтобетону;  $T$  – найнижча фактична температура асфальтобетону в даних природних умовах за відповідної швидкості зміни температури [12].

Формула (4) виражає умови тріщиностійкості асфальтобетону. Залежність  $1/T_{кр} = f(\lg V)$  повинна бути прямолінійною як для ненапруженого (за  $\sigma = 0$ ), так і напруженого (за  $\sigma = \text{const}$ ) асфальтобетону у випадку правомірності використання рівняння (2), застосованого до асфальтобетону.

Для перевірки ненапружених зразків асфальтобетону залежність  $1/T_{кр} = f(\lg V)$  прямолінійна (рис. 1), що підтверджує правильність відношень (2), (4) і дозволяє оцінити  $T_{кр}$  асфальтобетону забудь-якої швидкості згинання за даними, отриманими при двох значеннях швидкості.

Відомо, що в результаті старіння в'язкість асфальтобетону зростає і, явно, температура крихкості зміщується за даної швидкості формування в бік позитивних температур.

Для перевірки цієї обставини вихідний асфальтобетон протягом двох годин доводили до температури  $200^\circ\text{C}$  і підтримували цю температуру протягом 2,5 год, відповідно досліди проводили в умовах прискореного термостаріння [13].

Випробування асфальтобетону на згинання в широкому інтервалі температур і швидкості деформування, дозволили визначити температуру крихкості асфальтобетону після термостаріння (рис. 1).

Зміна температури асфальтобетону в експлуатаційних умовах рідко перевищує  $15^\circ\text{C}$  за 3 год. ( $10^4^\circ\text{C}$ ), що відповідає

швидкості деформування бітумо-мінерального матеріалу  $0,03\dots 0,04$  мм/хв [2]. Оцінка температури крихкості за швидкості деформування  $0,04$  мм/хв дає значення для вихідного і постарілого асфальтобетону  $-21$  і  $-18^\circ\text{C}$ .

На рисунку 2 можна побачити зміну міцності  $R_{згн}$  у широкому інтервалі температур залежно від кількості пластифікатора. Як видно з рисунка, додавання пластифікатора зміщує температуру крихкості в область негативних температур.

У разі додавання 0,67 і 1 % вагової частки мастила від кількості суміші температура крихкості зміщується з  $+10$  до  $-5$  і  $-16^\circ\text{C}$  відповідно.

Цікаво зазначити, що під час пружнов'язкого руйнування прямі міцність при згинанні – температура паралельні за різного вмісту пластифікатора, що зумовлено впливом пластифікатора на міжмолекулярну взаємодію. Подібні результати отримані раніше Б. Б. Льєвим при визначенні довгочасової міцності асфальтобетону у разі використання бітумів різної в'язкості [13].

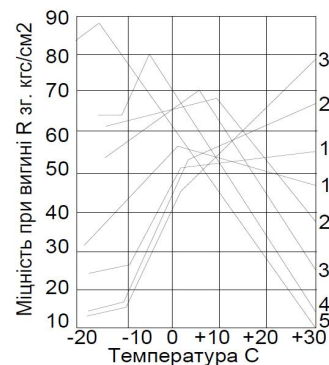


Рис. 2. Вплив кількості пластифікатора на величину температури крихкості, міцності при вигині та граничний вигин асфальтобетону  $V = 55$  мм/хв / Fig. 2. Influence of the amount of plasticizer on the value of the temperature of fragility, bending strength and limiting bend of asphalt concrete  $V = 55$  mm / min

У процесі експериментів записували на міліметровому папері діаграму навантажень – прогин за допомогою індуктивного датчика, підключеного до випробувальної машини ЦД-10 через посилювач, який дозволяє збільшувати фактичний прогин у 1 000 разів.

Межа прогину балочок у випадку додавання пластифікатора в кількості 0,67 і 1 % вагової частки суміші збільшується за негативних температур і зменшується за позитивних (рис. 2).

З урахуванням вищевказаного під час вибору типу і кількості пластифікатора для відновлення тріщиностійкості асфальтобетону в покритті критерієм оптимальності його кількості стають температура крихкості, відповідний прогин і міцність при згинанні, стійкість до зміщення.

Оптимальна кількість пластифікатора за всіма трьома критеріями - 0,67 % від кількості суміші по вазі.

**Висновки.** Запропоновано спосіб відновлення монолітності асфальтобетону в покритті шляхом уведення оптимальної кількості пластифікатора (мастила). Встановлена залежність температури крихкості напруженого асфальтобетону від швидкості деформації в інтервалі 15...544 мм/хв, температури від +50 до -20 °С дозволяє розрахувати їх  $T_{кр}$  за будь-якої швидкості згинання за даними, отриманими експериментально при двох значеннях швидкості згинання. Різниця у величині  $T_{кр}$  окремих асфальтобетонів у вказаному інтервалі швидкостей згинання сягає 30 °С.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. Н. Денисов Машини для ремонта асфальтобетонных покрытий / В. Н. Денисов, В. А. Самойлов, В. Н. Соломатин, Г. К. Сюньи // Автомобильные дороги. – 1974. – № 7. – С. 13–20.
2. Реологические свойства битумоминеральных материалов : монография / [А. В. Руденский, И. М. Руденская]. – Москва : Высшая школа, 1971. – 137 с.
3. А. О. Саль. Прочность асфальтобетона на растяжении при изгибе / А. О. Саль // Автомобильные дороги. – 1967. – № 7. – С. 25–28.
4. Л. Б. Гезенцевей. Асфальтовый бетон : монография / Л. Б. Гезенцевей. – Москва : Стройиздат, 1964. – 176 с.
5. Н. В. Горелышев. О пластичности дорожного асфальтового бетона / Н. В. Горелышев, Ф. Н. Пантелеев // Труды МАДИ. – Москва : Наука, 1953. – Вып. 15. – С. 35–43.
6. Г. К. Сюньи. Дорожный асфальтовый бетон : монография / Г. К. Сюньи. – Киев : Будівельник, 1962. – 134 с.
7. М. И. Волков. Асфальтобетонные покрытия : монография / М. И. Волков. – Донецк : Донбасс, 1970. – 230 с.
8. Прочность и долговечность асфальтобетона : монография / [Б. И. Ладыгин, И. К. Яцевич]. – Москва : Наука и техника, 1972. – 153 с.
9. И. А. Рыбьев. Релаксация напряжений в асфальтовом бетоне оптимальной структуры / И. А. Рыбьев, Л. В. Голованова // Строительство и архитектура. – 1974. – № 10. – С. 54–60.
10. Релаксационные явления в полимерах : монография / Г. М. Бертенев, Ю. М. Зеленева. – Москва : Химия, 1972. – 78 с.
11. Зуев Ю. С. Зависимость температуры хрупкости резин от скоростей деформации / Ю. С. Зуев // Каучук и резина. – 1974. – № 10. – С. 57–69.
12. В. Н. Шестаков. Прогнозирование охлаждения «черных» дорожных покрытий в связи с оценкой их трещиноустойчивости / В. Н. Шестаков // Строительство и архитектура. – 1974. – № 10. – С. 43–49.
13. А. С. Колбановская. Дорожные битумы : монография / А. С. Колбановская. – Москва : Транспорт, 1973. – 67 с.

### REFERENCES

1. Denisov V.N., Samoilov V.A., Solomatin V.N. and Suni G.K. *Mashinu dlya remonta asfaltobetonnykh pokrytiy* [Machines for repairing asphalt concrete pavements]. *Avtomobilnye dorogi* [Car roads]. 1974, no. 7, pp. 13–20. (in Russian).
2. Rudenskij A.V. and Rudenskaya I.M. *Reologicheskie svojstva bitumomineral'nykh materialov* [Rheological properties of bitumen mineral materials]. Moscow : Vysshaya shkola, 1971, 137 p. (in Russian).
3. Sall' A.O. *Prochnost' asfal'tobetona na rastyazhenii pri izgibe* [The strength of asphalt concrete in tension during bending]. *Avtomobil'nye dorogi* [Car roads]. 1967, no. 7, pp. 25–28. (in Russian).
4. Gezencvej L.B. *Asfal'tovyj beton* [Asphalt concrete]. Moscow : Strojizdat, 1964, 176 p. (in Russian).
5. Gorelyshev N.V. and Panteleev F.N. *O plastichnosti dorozhnogo asfal'tovogo betona* [On the plasticity of asphalt road concrete]. *Trudy MADI* [Proceedings MADI]. Vol. 15, Moscow : Nauka, 1953, pp. 35–43. (in Russian).
6. Syun'i G.K. *Dorozhnyj asfal'tovyj beton* [Road asphalt concrete]. Kyiv : Budivel'nik, 1962, 134 p. (in Russian).
7. Volkov M.I. *Asfal'tobetonnye pokrytiya* [Asphalt pavement]. Donetsk: Donbass, 1970, 230 p. (in Russian).
8. Ladygin B.I. and Yacevich I.K. *Prochnost' i dolgovechnost' asfal'tobetona* [Strength and durability of asphalt concrete]. Moscow : Nauka i tekhnika, 1972, 153 p. (in Russian).

9. Ryb'ev I.A. and Golovanova L.V. *Relaksaciya napryazhenij v asfal'tovom betone optimal'noj struktury* [Stress relaxation in asphalt concrete of optimal structure]. Construction and architecture Publ., 1974, no. 10, pp. 54–60. (in Russian).
10. Bertenev G.M. and Zeleneva Yu.M. *Relaksacionnye yavleniya v polimerah* [Relaxation phenomena in polymers]. Moscow : Himiya, 1972, 78 p. (in Russian).
11. Zuev U.S. *Zavisimost' temperatury hrupkosti rezin ot skorostej deformacii* [The dependence of the temperature of the fragility of rubber from strain rates]. *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber]. 1974, no. 10, pp. 57–69. (in Russian).
12. Shestakov V.N. *Prognozirovanie ohlazhdeniya «chernyh» dorozhnyh pokrytij v svyazi s ocnkoj ih treshchinoustojchivosti* [Prediction of cooling "black" pavements in connection with the assessment of their crack resistance ]. Construction and architecture Publ., 1974, no. 10, pp. 43–49. (in Russian).
13. Kolbanovskaya A.S. *Dorozhnye bitumy* [Road bitumen]. Moscow : Transport, 1973, 67 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 07.02.2019 р.

УДК 697.34

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.72.408

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖВ УКРАЇНИ

НЕЧЕПУРЕНКО Д. С.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук,

ПАВЛОВ Ф. І.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

МИХАЙЛОВА І. О.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра планування і організації виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(095)380-27-74, e-mail: [nechepurenko.daria@pgasa.dp.ua](mailto:nechepurenko.daria@pgasa.dp.ua), ORCIDID: 0000-0002-9292-4790

<sup>2</sup> Кафедра планування і організації виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(0562)47-39-46, e-mail: [piop@mail.pgasa.dp.ua](mailto:piop@mail.pgasa.dp.ua), ORCIDID: 0000-0002-4442-9277

<sup>3</sup> Кафедра планування і організації виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(0562)47-39-46, e-mail: [piop@mail.pgasa.dp.ua](mailto:piop@mail.pgasa.dp.ua), ORCIDID: 0000-0002-3647-3972

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Системи центрального тепlopостачання в Україні потребують реконструкції і оновлення. Враховуючи постійне зростання цін енергоносіїв, комплексна модернізація інфраструктури цих систем є як ніколи актуальною. Більшість тепловтрат в системах тепlopостачання відбувається в процесі транспортування теплоенергії, тому належну увагу слід приділити саме питанням енергозбереження в діючих теплових мережах (загальні втрати теплової енергії сягають в середньому 30...40 %). Значна частина трубопроводів теплових мереж, побудована в середині минулого століття, вже повністю вичерпала свій ресурс і знаходиться в аварійному стані. В результаті цього мають місце великі втрати тепла, економічні збитки внаслідок частих аварійних ситуацій, значних обсягів ремонтних робіт, погіршується якість послуг населенню, прискорюється старіння тепломереж тощо. Ці трубопроводи потребують негайної заміни. **Мета.** Метою даної статті є дослідження технічного стану теплових мереж в Україні та систематизація основних методів їх відновлення. **Висновки.** Авторами проаналізовано основні дефекти, які виникають під час проектування та експлуатації теплопроводів з мінераловатною та пінополіуретановою теплоізоляцією, їх основні причини та наслідки. Методи подовження експлуатаційного ресурсу теплових мереж України, спрямовані на усунення цих дефектів, сприяють зниженню тепловтрат при транспортуванні теплоенергії від джерела до споживача та забезпеченню надійності роботи тепломереж. Реконструкція систем тепlopостачання дасть змогу мешканцям мікрорайонів отримати кращі кліматичні умови в квартирах, а також значно менші рахунки за опалення. Крім того, зменшення витрат паливно-енергетичних ресурсів призведе до зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

**Ключові слова:** теплові мережі; надійність; енергозбереження; дефекти теплопроводів; ремонт; відновлення; трубопроводи з пінополіуретановою ізоляцією

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕПЛОСЕТЕЙ В УКРАИНЕ

НЕЧЕПУРЕНКО Д. С.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук,

ПАВЛОВ Ф. И.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

МИХАЙЛОВА И. А.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра планирования и организации производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38(095)380-27-74, e-mail: [nechepurenko.daria@pgasa.dp.ua](mailto:nechepurenko.daria@pgasa.dp.ua), ORCIDID: 0000-0002-9292-4790

<sup>2</sup> Кафедра планирования и организации производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38(0562)47-39-46, e-mail: [piop@mail.pgasa.dp.ua](mailto:piop@mail.pgasa.dp.ua), ORCIDID: 0000-0002-4442-9277

<sup>3</sup> Кафедра планирования и организации производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38(0562)47-39-46, e-mail: [piop@mail.pgasa.dp.ua](mailto:piop@mail.pgasa.dp.ua), ORCIDID: 0000-0002-3647-3972

**Аннотация.** *Постановка проблемы.* Системы центрального теплоснабжения в Украине нуждаются в реконструкции и обновлении. Учитывая постоянный рост цен на энергоносители, комплексная модернизация инфраструктуры этих систем является как никогда актуальной. Большинство тепловпотерь в системах теплоснабжения происходит в процессе транспортировки теплоэнергии, поэтому должное внимание следует



уделить именно вопросам энергосбережения в действующих тепловых сетях (общие потери тепловой энергии достигают в среднем 30...40 %). Значительная часть трубопроводов тепловых сетей, построенная в середине прошлого века, уже полностью исчерпала свой ресурс и находится в аварийном состоянии. В результате этого имеют место большие потери тепла, экономический ущерб из-за частых аварийных ситуаций, значительных объемов ремонтных работ, ухудшается качество услуг населению, ускоряется старение теплосетей и т. п. Трубопроводы требуют немедленной замены. **Целью** данной статьи является исследование технического состояния тепловых сетей в Украине и систематизация основных методов их восстановления. **Выводы.** Авторами проанализированы основные дефекты, возникающие при проектировании и эксплуатации теплопроводов с минераловатной и пенополиуретановой теплоизоляцией, их основные причины и последствия. Методы продления эксплуатационного ресурса тепловых сетей Украины, направленные на устранение этих дефектов, способствуют снижению теплопотерь при транспортировке теплоэнергии от источника к потребителю и обеспечению надежности работы теплосетей.

**Ключевые слова:** тепловые сети; надежность; энергосбережения; дефекты теплопроводов; ремонт; восстановление; трубопроводы с пенополиуретановой изоляцией

## RESEARCH OF TECHNICAL CONDITION AND METHODS OF HEAT NETWORKS RESTORATION IN UKRAINE

NECHEPURENKO D.S.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*,  
PAVLOV F.I.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
MYKHAILOVA I.O.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 380-27-74, e-mail: [nechepurenko.daria@pgasa.dp.ua](mailto:nechepurenko.daria@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-9292-4790

<sup>2</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-46, e-mail: [piop@mail.pgasa.dp.ua](mailto:piop@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-4442-9277

<sup>3</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-46, e-mail: [piop@mail.pgasa.dp.ua](mailto:piop@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-3647-3972

**Abstract. Problem statement.** Central heating systems in Ukraine need to be renovated and upgraded. Taking into account the constant growth of energy price, the complex modernization of the infrastructure of these systems is more than ever relevant. Most heat losses in heat supply systems occur during the heat transportation, therefore proper attention should be paid to the issue of energy conservation in existing heating networks (total heat losses reach 30...40 % on average). A significant part of the pipelines of thermal networks, built in the middle of the last century, has already completely exhausted its resource and they are in a critical condition. As a result, there are large heat losses, economic losses due to frequent emergencies, significant volumes of repairs, deteriorating quality of services for the population, accelerating the aging of the heating system, etc. These pipelines require an immediate replacement. **Purpose.** The purpose of this article is to study the technical state of heat networks in Ukraine and to systematize the basic methods of their restoration. **Conclusions.** The authors analyze the main defects that arise during the design and operation of heat conductors with mineral wool and polyurethane foam insulation, their main causes and consequences. Methods of extending the operational life of the Ukrainian heat networks, aimed at eliminating these defects, contribute to the reduction of heat losses in the transport of heat from the source to the consumer and to ensure the reliability of the heating system. Rehabilitation of the central heating systems will enable residents to get better climatic conditions in apartments, as well as significantly lower heating bills. In addition, reducing the cost of fuel and energy will lead to a reduction in CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** heat network; reliability; energy saving; defects in heat pipelines; repairs; restoration; pipelines with polyurethane foam insulation

**Постановка проблеми.** Системи центрального тепlopостачання в Україні потребують реконструкції і оновлення. Враховуючи постійне зростання цін енергоносіїв, комплексна модернізація інфраструктури цих систем стає як ніколи актуальною.

Більшість тепловтрат у системах тепlopостачання відбувається в процесі транспортування теплоенергії, тому належну увагу слід приділити саме питанням енергозбереження в діючих теплових мережах (загальні втрати теплової енергії сягають у середньому 30...40 %).

Загальна протяжність теплопроводів в Україні становить близько 47 000 км у двотрубному обчисленні. На балансі підприємств комунальної теплоенергетики України перебуває 20,8 тис. кілометрів теплових мереж у двотрубному обчисленні діаметром від 50 до 800 мм [8].

Значна частина трубопроводів теплових мереж, побудована в середині минулого століття, вже повністю вичерпала свій ресурс і перебуває в аварійному стані. В результаті цього мають місце великі втрати тепла, економічні збитки через часті аварійні ситуації, значні обсяги ремонтних робіт, погіршується якість послуг населенню, прискорюється старіння тепломереж тощо. Ці трубопроводи потребують негайної заміни. Термін безаварійної експлуатації теплових мереж не перевищує 10...15 років.

Основне та допоміжне обладнання значної кількості котелень вичерпало допустимі терміни експлуатації, що зумовлює високий рівень споживання палива, забруднення довкілля і спричинює зниження надійності та якості теплопостачання [10].

**Аналіз публікацій.** Все більше науковців приділяють увагу дослідженням комплексу питань із підвищення енергозбереження в житлово-комунальному господарстві, забезпечення технологічної та експлуатаційної надійності інженерних мереж.

Так, системи теплопостачання потребують відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу теплових мереж, зокрема теплопроводів.

**Мета статті** - проаналізувати сучасний стан теплових мереж в Україні та визначити основні методи їх ремонту та відновлення.

**Виклад матеріалу.** Теплові мережі забезпечують рух теплоносія від джерела теплопостачання до споживача і його повернення вже в охолодженому стані. Відповідно вони являють собою систему трубопроводів і спеціального обладнання. Теплоносієм може бути як гаряча вода, так і насичена водяна пара.

Теплова мережа складається зі з'єднаних між собою шляхом зварювання сталевих

труб, теплової ізоляції, компенсаторів теплових видовжень, запірної і регулювальної арматури, будівельних конструкцій, опор, камер, дренажних і повітровипускних пристроїв. Найменш надійний елемент системи - це підземні теплові мережі, з якими трапляється найбільше аварійних ситуацій.

Залежно від кількості паралельно прокладених теплопроводів теплові мережі поділяють на однотрубні, двотрубні і багатотрубні. Найширше застосування у теплопостачанні населених пунктів України знайшли чотиритрубні водяні системи: одна пара теплопроводів обслуговує системи опалення і вентиляції, а інша – систему гарячого водопостачання і технологічні потреби.

Надійність і довговічність систем теплопостачання залежить від множини факторів [4; 5; 6; 9], зокрема, від технології прокладання трубопроводів опалення. Найбільш поширене прокладання труб у землі – підземне (на відміну від надземного), яке, у свою чергу, поділяється на каналне і безканалне.

Основна перевага каналного прокладання трубопроводів полягає у тому, що воно дає можливість захистити труби від зовнішніх впливів. Безканалне – дозволяє скоротити обсяги земляних робіт, терміни і витрати на будівництво. Ця технологія ускладнює проведення ремонтних робіт, хоча сучасні захисні оболонки для трубопроводів здатні гарантувати їх надійність [7].

Загальний аналіз технічного стану існуючих теплових мереж показує, що близько 80 % прокладені в непрохідних залізобетонних каналах з підвісною ізоляцією у вигляді мінеральної вати. Основний тип антикорозійного покриття трубопроводів - ізол на ізоляційній мастиці. Канали в більшості не захищені від проникнення ґрунтової та іншої води, що спричинює значні втрати тепла через ізоляцію та з витокami, розрегулювання системи теплопостачання та недовговічність розподільчих трубопроводів мереж гарячого водопостачання. Відсутність приладів

обліку витрат теплової енергії у споживачів спричинює її нераціональне використання, а відсутність можливості регулювання параметрів теплоносія впливає на забезпечення комфортних умов проживання споживачів тепла.

Втрати тепла через неякісну ізоляцію трубопроводів із витокami теплоносія у разі пошкодження труб становлять понад 20 % від відпущеної теплової енергії проти 13 %, які передбачені нормами [10].

Основні методи ремонту та поновлення тепломереж можна систематизувати у групи відповідно до заходів щодо усунення того чи іншого дефекту трубопроводів і устаткування.

Дефекти можуть бути результатом дії технологічних або експлуатаційних факторів.

До першої групи належать:

- помилки у проектуванні;
- металургійні дефекти;
- дефекти виготовлення;
- дефекти складання й монтажу устаткування;
- неточності в проектних розрахунках під час вибору матеріалу;
- недоліки конструкції устаткування тощо.

До другої групи належать:

- дефекти під час проведення ремонтних робіт;
- помилки персоналу і порушення виробничих інструкцій;
- старіння ізоляції, спрацювання устаткування;
- невідповідність умов роботи устаткування розрахунковим режимам тощо [1].

Зниження тепловтрат в інженерних мережах можна досягти, перш за все, шляхом поступового переходу на сучасні трубопроводи, зокрема, на теплові мережі з пінополіуретановою тепловою і поліетиленовою гідравлічною ізоляціями. Прокладання в ґрунті таких трубопроводів відповідно до вимог нормативних документів здійснюється безканалним способом. Нормативний термін експлуатації

таких трубопроводів досягає понад 25...30 років.

У мережах із попередньо ізольованими в заводських умовах трубопроводами втрати теплової енергії близько 3...7 %, але таких теплових мереж ще дуже мало, а вартість їх виготовлення різко підвищилася.

Трубопроводи з пінополіуретановою ізоляцією характеризуються тим, що через рахунок багат шарову структуру і специфічні характеристики в них виникають дефекти, які не були властиві тепломережам із мінераловатною ізоляцією.

Так, унаслідок порушень технології виготовлення, монтажу та укладання, а також через те, що значна частина трубопроводів виготовляється зі старих газопроводів, у цих трубопроводах можуть виникати аварії вже на перших роках експлуатації.

На основі досліджень [2; 3] виявлено такі основні дефекти, які найчастіше виникають у трубопроводах із пінополіуретановою ізоляцією:

1) розрив трубопроводу – наслідок дії корозії (при цьому основна причина виникнення внутрішньої корозії - це наявність домішок у теплоносії, а зовнішньої – дія блукаючих струмів) – може спричинити провалювання ґрунту на значних ділянках із частковим або повним руйнуванням комунікацій, фундаментів, дорожнього покриття, що пролягають поряд, а також припинення теплопостачання споживачів;

2) руйнування тепло- і гідроізоляції – результат порушення технології укладання, з'єднання, герметизації та засипання теплопроводів, а також дії вібрації від руху транспорту і проведення земляних робіт на території пролягання тепломережі – відкриває доступ ґрунтового електроліту до тіла металевого трубопроводу, що спричинює його корозію;

3) руйнування гідроізоляції – найменш небезпечний дефект (тому що руйнування шару теплоізоляції відбувається поступово) – може виникнути як у період виконання монтажних робіт через механічне пошкодження, так і під час експлуатації від

надмірного тиску ґрунту від руху транспорту на окремих ділянках тепломережі;

4) так звана «мігруюча вода» – це вода в просторі між внутрішньою металевією трубою та гідроізоляцією, яка виникає у результаті цяткової корозії або появи свищів: найбільша небезпека цього дефекту полягає у тому, що постійний витік незначної кількості теплоносія неможливо зареєструвати приладами на замірних пунктах. Таким чином, вода мігрує на значні відстані, створюючи корозію зовнішніх стінок і руйнуючи теплову ізоляцію трубопроводів, як наслідок – його поступова деформація та поява розривів.

Для запобігання виникнення аварійних ситуацій та раціонального планування ремонтних робіт необхідно завчасно виявляти місця дефектів у трубопроводах із пінополіуретановою ізоляцією безканальної прокладки.

Це можливо за рахунок сучасних інформаційно-вимірювальних систем контролю підземних теплових мереж як в опалювальній, так і в неопалювальній періоди [3].

**Висновки.** Проведеним дослідженням визначено основні дефекти трубопроводів та устаткування теплових мереж. Методи

подовження експлуатаційного ресурсу теплових мереж України, спрямовані на усунення цих дефектів, сприяють вирішенню таких основних виробничо-економічних питань, як:

1) зниження тепловтрат під час транспортування теплоенергії від джерела до споживача;

2) забезпечення надійності роботи тепломереж;

3) мінімізація термінів відключення споживання в період проведення ремонтних робіт;

4) зниження обсягів споживання енергоносіїв;

5) підвищення якості послуг, що надаються споживачам.

Реконструкція систем теплопостачання дасть змогу мешканцям мікрорайонів отримати кращі кліматичні умови в квартирах, а також значно менші рахунки за опалення. Крім того, зменшення витрат паливно-енергетичних ресурсів зумовить зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

Перспективою подальшого дослідження стане систематизація методів підвищення комплексної ефективності функціонування систем теплопостачання з урахуванням впливу на них організаційно-технологічних факторів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії : монографія / [В. П. Бабак, В. С. Берегун]; за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака. – Київ : Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. – 298 с. ISBN 978-966-02-7967-4. – Режим доступу : <https://www.researchgate.net/publication/325126986> Aparatno programne zabezpecenna monitoringu ob'ektiv g eneruvanna transportuvanna ta spozivanna teplovoi energii Hardware software for monitoring the objects of generation transportation and consumptio.
2. Ващишак І. Р. Метод ідентифікації видів дефектів трубопроводів підземних теплових мереж / І. Р. Ващишак, С. П. Ващишак, Л. А. Витвицька, П. М. Райтер // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2013. – № 1. – С. 162–171. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif\\_2013\\_1\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2013_1_22).
3. І. Р. Ващишак Удосконалення методів безконтактного контролю стану підземних теплових мереж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / І. Р. Ващишак ; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2012. – 20 с. – Режим доступу : <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/1774>.
4. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі: ДБН В.2.5-39:2008. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. – 149 с. – Режим доступу : [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=47699](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=47699).
5. Т. С. Кравчуновська Аналіз сучасних умов та вимог щодо експлуатації мереж теплозабезпечення в Україні / Т. С. Кравчуновська, Д. С. Нечепуренко, Т. В. Данилова // Новітні технології в будівництві. – 2018. – № 34. – С. 21–24. – Режим доступу : [www.ntinbuilding.ndibv.org.ua/archive/2018/34\\_2018/6.pdf](http://www.ntinbuilding.ndibv.org.ua/archive/2018/34_2018/6.pdf).
6. Т. В. Данилова, Д. С. Нечепуренко Дослідження основних показників ефективності функціонування системи теплопостачання / Т. В. Данилова, Д. С. Нечепуренко // Будівництво, матеріалознавство,

машинобудування. – 2018. – Вип. 104. – С. 129–133. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/smmc\\_2018\\_104\\_23.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/smmc_2018_104_23.pdf).

7. Опалення : навч. посіб. / За ред. Ю. Ю. Глушко // Ресурсний центр ГУРТ, 2018. – 102 с. – Режим доступу : <https://www.gurt.org.ua/uploads/news/files/2016-8/Опалення-min.pdf>.
8. Оптимізація систем теплопостачання із використанням економіко-математичного моделювання : монографія / За заг. ред. О. М. Гаврися. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – 209 с. – Режим доступу : <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19168>.
9. Поліщук М. В. Фактори впливу на надійність мереж систем теплопостачання / М. В. Поліщук, Г. С. Ратушняк. – Молодь в технічних науках : дослідження, проблеми, перспективи : міжнар. наук.-практ. інтернет-конференція. – Вінниця : ВНТУ. – 17 квітня 2015 року. – 77 с. – Режим доступу : <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials &line=15&mat=107>.
10. Ющенко Н. Л. До питання підвищення енергоефективності централізованого теплопостачання в Україні / Н. Л. Ющенко, О. Л. Ігнатенков // Глобальні та національні проблеми економіки : електронне наукове видання. – Миколаївський національний університет ім В. О. Сухомлинського. – Вип. 20. – 2017. – С. 1060–1064. – Режим доступу : <http://global-national.in.ua/archive/20-2017/217.pdf>.

## REFERENCES

1. Babak V.P. and Beregun V.S. *Aparatno-prohramne zabezpechennia monitorynhu ob'ektiv heneruvannia, transportuvannia ta spozhyvannia teplovoi enerhii* [Hardware-software for monitoring objects of generation, transportation and consumption of thermal energy]. By red. mem.-kor. NAS of Ukraine V.P. Babak. Kyiv : In-tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy, 2016, 298 p., ISBN 978-966-02-7967-4. (in Ukrainian).
2. Vashchysyak I.R., Vashchysyak S.P., Vytvytska L.A. and Raiter P.M. *Metod identyfikatsii vydiv defektiv truboprovodiv pidzemnykh teplovykh merezh* [Method of identification of types of defects of underground heat networks pipelines]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu* [Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Petroleum and gas]. 2013, no. 1, pp. 162–171. (in Ukrainian).
3. Vashchysyak I.R. *Udoskonalennia metodiv bezkontaktynoho kontroliu stanu pidzemnykh teplovykh merezh: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 05.11.13 «Prylady i metody kontroliu ta vyznachennia skladu rehovyn»* [Improvement of methods of noncontact control of underground heat networks: author's abstract. dis for the sciences. Degree Candidate Tech. Sciences: special 05.11.13 «Instruments and methods of control and determination of substance composition»]. Ivano-Frankivsk National Technical University of Petroleum and gas, Ivano-Frankivsk, 2012, 20 p. (in Ukrainian).
4. *Inzhenerne obladdannia budynkiv i sporud. Zovnishni merezhi ta sporudy. Teplovi merezhi : DBN V.2.5-39:2008.* [Engineering equipment of buildings and structures. Outdoor networks and facilities. Thermal networks : state building codes V.2.5-39:2008.]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2008, 149 p. (in Ukrainian).
5. Kravchunovska T.S., Nechepurenko D.S. and Danylova T.V. *Analiz suchasnykh umov ta vymoh shchodo ekspluatatsii merezh teplozabezpechennia v Ukraini* [Analysis of current conditions and requirements for maintenance of heat supply networks in Ukraine]. *Novitni tekhnologii v budivnytstvi* [The latest technologies in construction]. 2018, no. 34, pp. 21–24. (in Ukrainian).
6. Danylova T.V. and Nechepurenko D.S. *Doslidzhennia osnovnykh pokaznykiv efektyvnosti funktsionuvannia systemy teplopostachannia* [Research of main effectiveness' parameters of functioning of heat supply system]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia: zb. nauch. prats.* [Construction, materialsscience, mechanical engineering]. 2018, no. 104, pp. 129–133. (in Ukrainian).
7. *Opalennia : Navchalnyi posibnyk* [Heating : Tutorial]. By red. Yu.Yu. Hlushko. HURT Resource Center, 2018, 102 p. (in Ukrainian).
8. *Optymizatsiia system teplopostachannia iz vykorystanniam ekonomiko-matematichnoho modeliuвання* [Optimization of heat supply systems with the use of economic-mathematical modeling]. By red. O.M. Havrysia. Kharkiv : NTU «KhPI», 2015, 209 p. (in Ukrainian).
9. Polishchuk M.V. and Ratushniak H.S. *Faktory vplyvu na nadiinist merezh system teplopostachannia* [Factors influencing the reliability of heating networks]. Youth in technical sciences: research, problems, perspectives : Intern. scient. and pract. Internet conf. Vinnitsa : VNTU, 16–17 April, 2015, 77 p. (in Ukrainian).
10. Yushchenko N.L. and Ihnatenkov O.L. *Do pytannia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti tsentralizovanoho teplopostachannia v Ukraini* [On the issue of increasing energy efficiency of district heating in Ukraine]. *Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky: Elektronne naukove vydannia* [Global and national problems of the economy : electronic scientific publication]. Mykolaiv National University named by V.O. Sukhomlynsky, no. 20, 2017, pp. 1060–1064. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 17.02.2019 р.

УДК 624.042

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.79.409

## ПРАКТИЧНІ ЗАДАЧІ ІМОВІРНІСНОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВОГО СИЛОСА

МАХІНЬКО Н. О., *канд. техн. наук*

Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, 02000, Київ, Україна, тел. +38(050)3045072, e-mail: [pasargada1985@gmail.com](mailto:pasargada1985@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

**Анотація. Постановка проблеми.** Застосування імовірнісних методів в інженерній практиці наразі залишається недостатнім. Цьому перешкоджає необхідність використання специфічної галузі знань (теорія випадкових процесів, математична статистика, теорія надійності будівель і споруд та ін.), що традиційно належать до сфери високоінтелектуальних наукових досліджень. У той же час кількісне знаходження показників надійності - необхідний момент у процесі створення будь-якої будівлі чи споруди та має бути не лише обґрунтоване в нормативних документах, а і безпосередньо застосовуватися в процесі конструкторської діяльності. З огляду на це, дослідження сфокусоване тільки на отриманні кількісної оцінки імовірності безвідмовної роботи для окремих елементів сталевих ємностей зберігання, відповідно до авторської методики та основних положень імовірнісного розрахунку. При цьому модель функції надійності повністю відповідає імовірнісній природі постійних та технологічних навантажень. Для елементів сталевих ємностей зберігання це реалізується шляхом представлення випадкової величини узагальненої міцності нормальним законом розподілу. Для снігових і вітрових навантажень, які описуються технікою випадкових процесів, використано методику, що дозволяє перейти від дослідження всього процесу до розгляду лише його максимумів, описаних подвійним експоненціальним розподілом Гумбеля. **Мета статті** - навести аналітично простий алгоритм для визначення рівня надійності елементів сталевих ємностей зберігання чи розв'язання інших супутніх задач імовірнісного розрахунку такого виду конструкцій. На базі практичних прикладів проілюструвати процедуру розв'язання задач даного типу та ознайомити інженера з елементарними принципами розрахунку елементів сталевих конструкцій ємностей зберігання на надійність. **Висновок.** На базі єдиного підходу та із застосуванням апроксимуючих виразів і лаконічних математичних викладок, наведено узагальнений алгоритм аналітичного імовірнісного розрахунку елементів сталевих ємностей зберігання. Відповідно до формульного вираження здійснено числовий розрахунок імовірності безвідмовної роботи кільцевого ребра жорсткості циліндричної ємності та розв'язано практичну задачу підбору поперечного перерізу радіального ребра жорсткості за заданим рівнем нормативної імовірності роботи.

**Ключові слова:** *ємність зберігання; імовірнісний розрахунок; функція надійності; коефіцієнт критичного фактора, імовірність безвідмовної роботи*

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНОГО СИЛОСА

МАХИНЬКО Н. А., *канд. техн. наук*

Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, 02000, Киев, Украина, тел. +38(050)3045072, e-mail: [pasargada1985@gmail.com](mailto:pasargada1985@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

**Аннотация. Постановка проблемы.** Использование вероятностных методов в инженерной практике в данное время является недостаточным. Этому препятствует необходимость использования специфической области знаний (теория случайных процессов, математическая статистика, теория надежности зданий и сооружений и др.), которая традиционно относится к сфере высокоинтеллектуальных научных исследований. В то же время количественное нахождение показателей надежности является необходимым моментом в процессе создания любого строительного объекта и должно быть не только обосновано в нормативных документах, но и непосредственно применяться в процессе конструкторской деятельности. Учитывая это, исследования сфокусированы исключительно на получении количественной оценки вероятности безотказной работы для отдельных элементов стальных емкостей хранения, в соответствии с авторской методикой и основными положениями вероятностного расчета. При этом модель функции надежности полностью соответствует вероятностной природе постоянных и технологических нагрузок. Для элементов стальных емкостей хранения это реализуется путем представления случайной величины обобщенной прочности нормальным законом распределения. Для снеговых и ветровых нагрузок, которые описываются техникой случайных процессов, использована методика, позволяющая перейти от исследования всего процесса к рассмотрению только его максимумов, описанных двойным экспоненциальным распределением Гумбеля. **Цель статьи** - предоставить аналитически простой алгоритм для определения уровня надежности элементов стальных емкостей хранения или решения других сопутствующих задач вероятностного расчета данного вида конструкций. На базе

практических примеров проиллюстрировать процедуру решения задач данного типа и ознакомить инженера с элементарными принципами расчета элементов стальных конструкций емкостей хранения на надежность. **Вывод.** В рамках единого подхода и при применении аппроксимирующих выражений и лаконичных математических выкладок представлен обобщенный алгоритм аналитического вероятностного расчета элементов стальных емкостей хранения. Согласно формульному выражению осуществлен числовой расчет вероятности безотказной работы кольцевого ребра жесткости цилиндрической емкости и решена практическая задача подбора поперечного сечения радиального ребра жесткости по заданному уровню нормативной вероятности работы.

**Ключевые слова:** емкость хранения; вероятностный расчет; функция надежности; коэффициент критического фактора, вероятность безотказной работы

## PRACTICAL TASKS OF PROBABILITY CALCULATION OF THE ELEMENTS OF STEEL SILOS

MAKHINKO N.O., *Cand. Sc. (Tech.)*

National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova Ave., Kyiv, Ukraine, tel. +38 (050) 304-50-72, e-mail: [pasargada1985@gmail.com](mailto:pasargada1985@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

**Abstract. Problem statement.** The use of probability methods in engineering practice is currently insufficient. This is hindered by the need to use a specific area of knowledge, such as the theory of random processes, mathematical statistics, the theory of reliability of buildings and structures, etc. However, the quantitative calculation of reliability indicators is a necessary moment in the process of building any construction. The level of reliability should be substantiated in the regulatory documents and directly applied in the process of design activities. Considering this, the research focuses exclusively on obtaining a quantitative estimate of the probability of failure-free operation for separate elements of steel storage capacities. This was done in accordance with the author's methodology and the main features of probability calculation. At the same time, the model of reliability function completely corresponds to the probability nature of constant and technological loads. For elements of steel storage capacities representing a random value of generalized strength is realized by a normal distribution law. For snow and wind loads, which are described by the method of random processes, it is used a technique that allows to proceed from the study of the whole process to the consideration of only its maximums, which are described by the double exponential distribution of Humbel. The example of solving practical problems will provide visibility to the performed research and will help the ordinary specialist to approach to the mastering of probabilistic calculations. **Purpose.** To provide an analytically simple algorithm for determining the level of reliability of elements of steel storage capacities or for solving other related problems of probability calculation of the given type of structures. On the basis of practical examples to illustrate the procedure of solving problems of this type and acquaint the engineer with the elementary principles of calculating for reliability the elements of steel construction of the storage capacities. **Conclusion.** On the basis of the unified approach and using the approximating expressions and concise mathematical calculations, a generalized algorithm for analytic probability calculation of elements of steel storage capacities is represented. Accordingly to formulas, it was made a numerical calculation of the probability of a failure-free operation, the reliability of the circular stiffener of the cylindrical capacity and it was solved the practical problem of the selection of the cross-section radial stiffener, according to the given level of the normative probability of work.

**Keywords:** storage capacity, probability calculation, reliability function, coefficient of critical factor, probability of failure-free operation

**Постановка проблеми.** Практичний розрахунок надійності елементів конструкцій будівель і споруд у більшості випадків належить до сфери наукових досліджень, реалізація яких становить прерогативу науково-дослідних установ чи спеціалістів цієї проблематики. Перед усім це пов'язано з великим обсягом поглиблених знань в галузі теорії імовірності та математичної статистики, а також розумінням особливостей процесу імовірнісного опису навантажень, що діють на конструкцію, та стохастичної природи її

міцнісних характеристик. По-друге, наразі не існує єдиної точки зору на імовірнісні методи та моделі, що застосовуються у розрахунках надійності будівельних конструкцій. Власне й сам показник надійності може включати в себе різні характеристики – безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та ін.

З огляду на це, дослідження сфокусоване тільки на отриманні кількісної оцінки імовірності безвідмовної роботи окремих елементів сталевих ємностей зберігання, відповідно до авторської

методики та основних положень імовірнісного розрахунку. Модель функції надійності має відповідати імовірнісній природі постійних та технологічних навантажень. Для елементів сталевих емностей зберігання це реалізується шляхом представлення випадкової величини узагальненої міцності нормальним законом розподілу. Також для снігових і вітрових навантажень, які описуються технікою випадкових процесів, застосовується методика, що дозволяє перейти від дослідження всього процесу до розгляду лише його максимумів, описаних подвійним експоненціальним розподілом Гумбеля.

**Аналіз публікацій.** Фундаментальні засади теорії надійності ґрунтуються на працях видатних учених [1-3]. В подальшому імовірнісна концепція розрахунку будівельних конструкцій знайшла розвиток у чималій кількості наукових літературних джерел теоретичного [1; 2; 6; 7] та практичного спрямування [1; 2; 6; 7]. Також варто відмітити праці безпосередньо використані в процесі дослідження [1; 2; 6].

**Мета і завдання.** Зважаючи на складність оцінювання надійності в руслі інженерного розрахунку, актуальним завданням постає не лише наведення спрощеного алгоритму обчислень на базі апроксимуючих виразів та узагальнених підходів, а і практичний приклад отримання кількісного показника. Такий зразок надасть наочності виконаному дослідженню та сприятиме наближенню рядового спеціаліста до освоєння імовірнісних засад розрахунку.

**Виклад матеріалу.** Процедура оцінювання надійності виконаємо з умови використання граничної нерівності вираженої через критичний фактор

$$K_R = S/R \leq 1,0 \quad (1)$$

де  $R$  – узагальнена величина міцності;  
 $S$  – узагальнена величина зусилля.

В загальному випадку визначення випадкової величини критичного фактора може бути здійснене відповідно до формули

$$K_{R,i} = m_K \cdot \gamma_{K,i} \quad (2)$$

де  $m_K = m_S/m_R$  – математичне очікування критичного фактора, рівне відношенню відповідних статистичних характеристик узагальнених величин зусилля та міцності;  
 $\gamma_{K,i}$  – ранжована змінна, що визначається як

$$\gamma_{K,i} = [1 + \gamma_{S,i} V_S] / [1 + \gamma_{R,i} V_R] \quad (3)$$

де  $\gamma_{S,i}$  і  $\gamma_{R,i}$  – нормовані випадкові величини з визначеним законом розподілу.

Або ж можна запропонувати більш простий варіант формули (2):

$$K_R = m_K \cdot (A_K y^2 + B_K y + C_K) \quad (4)$$

де  $y = -\ln[-\ln(F_\gamma)]$  – аргумент подвійного експоненціального розподілу Гумбеля;  
 коефіцієнта  $A_K$ ,  $B_K$  і  $C_K$  – залежать від обраних законів розподілу  $\gamma_{S,i}$  і  $\gamma_{R,i}$  та знаходяться методом найменших квадратів.

Фактична імовірність безвідмовної роботи елемента визначиться як

$$y_F = \left( \sqrt{B_K^2 - 4A_K(C_K - 1/m_K)} - B_K \right) / 2A_K \quad (5)$$

Величини коефіцієнтів  $A_K$ ,  $B_K$  і  $C_K$  залежать від коефіцієнту варіації  $V_S$  навантаження (внутрішнього зусилля чи напруження) та описуються такими формулами:

$$A_K = \alpha_A V_S, \quad B_K = \alpha_B V_S, \quad C_K = 1 - \alpha_C V_S \quad (6)$$

де  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$  і  $\alpha_C$  – коефіцієнти, числові значення яких при розподілі навантаження за подвійним експоненціальним законом Гумбеля  $\alpha_A \approx 0$ ,  $\alpha_B \approx 0,84$ ,  $\alpha_C \approx 0,57$ .

Функція надійності елемента з урахуванням (6) має вигляд:

$$y_F = -\ln[-\ln(F_\gamma)] = \quad (7)$$

$$= \left[ \sqrt{\alpha_B^2 - 4\alpha_A^2(1 - \alpha_C V_S - 1/m_K)} - \alpha_B \right] / 2\alpha_A.$$



Імовірність безвідмовної роботи в явному вигляді:

$$F_y = \exp \left[ -\exp \left( \frac{\alpha_B - \sqrt{\alpha_B^2 - 4\alpha_A^2(1 - \alpha_C V_S - \frac{1}{m_K})}}{2\alpha_A} \right) \right] \quad (8)$$

Розглянемо процедуру оцінювання надійності кільцевого ребра жорсткості циліндричної ємності діаметром  $D_w = 22000$  мм, що працює на центральний стиск. Переріз елемента прийемо у вигляді швелера з відгинами полицок (рис. 1) та розмірами: висота  $h = 200$  мм, ширина полицок  $b_f = 75$  мм, зазор між відгинами  $c_f = 150$  мм, товщина  $t_w = 2,5$  мм.

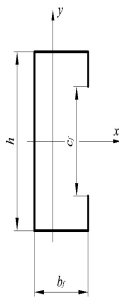


Рис. 1. Поперечний переріз кільцевого ребра жорсткості / Fig. 1. Cross section of ring ring of rigidity

Довжина ребра  $l_p = 250$  см. Матеріал – сталь із статистичними характеристиками: математичне очікування границі текучості  $m_R = 450$  МПа; коефіцієнт варіації границі текучості  $V_R = 0,08$ . Розрахунок виконувати для третього снігового району України.

Виконуємо попередній статичний розрахунок елемента кільцевого ребра з урахуванням імовірнісних параметрів снігового навантаження. Поздовжнє зусилля стиску в кільцевому ребрі, з умови рівноваги вузла примикання кільцевих ребер до головного радіального обчислюється за формулою:

$$N_p = [n_M / 2\pi] (N_b - N_t) \quad (9)$$

де  $n_M$  – кількість головних радіальних балок;  $N_b$  і  $N_t$  – поздовжні зусилля в головному радіальному ребрі нижче і вище кільцевого ребра жорсткості. Ця розрахункова процедура була детально описана в [6]. В результаті були отримані статистичні характеристики (математичне очікування та коефіцієнт варіації) випадкової величинимаксимумів поздовжньої сили  $m_S = 65$  кН,  $V_S = 0,3$ .

Визначимо статистичні характеристики обраного перерізу – площу  $A_0$ ; координати центра ваги  $x_0$ ,  $y_0$ ; моменти інерції відносно центральних вісей  $J_x$ ,  $J_y$ ; моменти опору  $W_x$ ,  $W_{y,max}$ ,  $W_{y,min}$  та радіуси інерції  $i_x$ ,  $i_y$ . Для цього використаємо наближені формули:

$$A_0 = h t_w \psi_A \quad (10)$$

$$x_0 = h \psi_x; \quad y_0 = h \psi_y \quad (11)$$

$$J_x = h^3 t_w \psi_{J,x}; \quad J_y = h^3 t_w \psi_{J,y} \quad (12)$$

$$W_x = 2 h^2 t_w \psi_{J,x} \quad (13)$$

$$W_{y,max} = h^2 t_w \frac{\psi_{J,y}}{\psi_x}; \quad W_{y,min} = \frac{h^2 t_w \psi_{J,y}}{\alpha_1 - \psi_x} \quad (14)$$

$$i_x = h \sqrt{\psi_{J,x} / \psi_A}; \quad i_y = h \sqrt{\psi_{J,y} / \psi_A} \quad (15)$$

де  $\psi_A$ ,  $\psi_x$ ,  $\psi_y$ ,  $\psi_{J,x}$ ,  $\psi_{J,y}$  – безрозмірні коефіцієнти, які характеризують форму заданого перерізу та знаходяться за наступними формулами:

$$\alpha_1 = b_f / h = 0,375 \quad \alpha_2 = c_f / h = 0,75 \quad (16)$$

$$\psi_A = 2 + 2\alpha_1 - \alpha_2 = 2 \quad (17)$$

$$\psi_x = [\alpha_1^2 + \alpha_1(1 - \alpha_2)] / \psi_A = 0,117 \quad (18)$$

$$\psi_{J,x} = [2 + 6\alpha_1 - \alpha_2^3] / 12 = 0,32 \quad (19)$$

$$\psi_{J,y} = \psi_x^2 + \alpha_1^3/6 + 2\alpha_1(0,5\alpha_1 - \psi_x)^2 + (1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \psi_x)^2 = 0,04 \quad (20)$$

Статистичні характеристики :

$$A_0 = 10 \text{ см}^2, \quad x_0 = 2,34 \text{ см},$$

$$J_x = 640 \text{ см}^4, \quad J_y = 80 \text{ см}^4, \quad W_x = 64 \text{ см}^3,$$

$$W_{y,max} = 34,2 \text{ см}^3, \quad W_{y,min} = 15,5 \text{ см}^3,$$

$$i_x = 8,0 \text{ см}, \quad i_y = 2,83 \text{ см},$$

Обчислимо мінімальну гнучкість ребра:

$$\lambda_{min} = I_p / i_{min} \approx 88 \quad (21)$$

Враховуючи, що розглядуваний елемент ребра є стиснутим, на резерв його несної здатності буде впливати коефіцієнт поздовжнього згину  $\varphi$  [8]. Для вираження «незручної» залежності  $\varphi$  від гнучкості елемента, границі текучості сталі  $R_y$  та типу кривої стійкості  $\varphi(R_y, \lambda)$  [5, 8] можна скористатися апроксимуючим виразом:

$$\varphi = \exp(-\delta \lambda^\varepsilon R_y / (\pi^2 E)) \quad (22)$$

де  $\varepsilon$  і  $\delta$  – параметри кривої стійкості.

Відповідно до математичного очікування критичного фактора отримає вигляд:

$$m_K = m_S / m_R \cdot \exp(\delta \lambda^2 m_R / [\pi^2 E]) \quad (23)$$

Враховуючи, що для кривої типу «с»  $\varepsilon = 0,6$  і  $\delta = 2$ , отримаємо  $m_K \approx 0,4$ .

Відповідно (6) та (8) виконуємо оцінювання імовірності безвідмовної роботи ребра:

$$N_q(y) = -\sin \beta \left[ \frac{H_A}{\text{tg } \beta} + q_A I_M y \left( \Delta q + \frac{y}{2} (1 - \Delta q) \right) \right], \quad (24)$$

$$Q_q(y) = q_A I_M \cos \beta \left[ y \Delta q - \frac{1}{3} \left( \frac{1}{2} + \Delta q \right) + \frac{y^2}{2} (1 - \Delta q) \right], \quad (25)$$

$$F_\gamma = \exp[-\exp(-6,627)] = 0,99868$$

Як другий приклад виконаємо підбір поперечного перерізу радіального ребра жорсткості конічної покрівлі круглого силоса діаметром  $D_w = 5500$  мм на дію снігового навантаження. Ребра приймаємо з кутовим кроком  $30^\circ$ , а переріз у вигляді гнutoго швелера без відгинів полицок. Матеріал обираємо, як у попередньому прикладі. Розрахунок виконуємо для третього снігового району України. Навантаження від термопідвіски не враховується, а діаметр центрального опорного кільця приймаємо  $d_0 = 400$  мм.

Радіальне ребро покрівлі (рис. 2) працює на стиск зі згином.

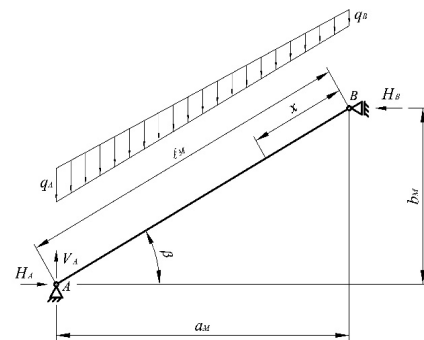


Рис. 2. Розрахункова схема головного радіального ребра жорсткості / Fig. 2. Schematic diagram of the main radial rib of rigidity

Розподіл внутрішніх зусиль поздовжнього зусилля  $N_{q,F}$ , поперечної сили  $Q_{q,F}$  та згинального моменту  $M_{q,F}$  описується функціями [6]:

$$M_q(y) = \frac{q_A I_M^2}{6} y \cos \beta (1-y) [1 + y(1-\Delta q) + 2\Delta q] \quad (26)$$

Умовні позначення величин у формулах (24)-(26):  $\Delta q = \Delta_D = d_0 / D_w$  – відношення діаметрів;  $\beta$  – кут нахилу покрівлі;  $I_M$  – довжина головної радіальної балки;  $y = x / I_M$  – безрозмірний параметр.

В розрахунковому перерізі ребра, на відстані  $y_{M,\max}$  від правої опори зусилля в перерізі визначаються як

$$N_M = [q_A I_M (1 + 2\Delta q)] / (6 \sin \beta) \quad (27)$$

$$M_{q,\max} = \frac{q_A I_M^2 \cos \beta}{18} \left( \frac{2f_M^3 - 3f_M^2 + 1}{f_M^2 - \Delta q} \right) \quad (28)$$

де  $f_M$  – параметр навантаження. З урахуванням вихідних даних

$$\Delta q = \Delta_D = d_0 / D_w \approx 0,073 \quad (29)$$

$$f_M = \sqrt{[1 + \Delta q + \Delta q^2]} / 3 = 0,6$$

$$(30) \quad y_{M,\max} = (f_M - \Delta q) / [1 - \Delta q] = 0,57 \quad (31)$$

Довжина головного ребра

$$I_M = 0,5 D_w (1 - \Delta_D) / \cos \beta \approx 2944 \text{ мм.} \quad (32)$$

Відповідно до формул (27), (28)

випадкові величини внутрішніх зусиль

$$N_M^{\%} \approx 1,62 \cdot S_m^{\%}, \quad M_{q,\max}^{\%} = 0,737 \cdot S_m^{\%}$$

де  $S_m^{\%}$  – випадкова величина максимумів випадкового процесу снігового навантаження.

Втрата стійкості ребра неможлива, завдяки закріпленню верхнього поясу профільованим листом покриття. Тому підбір геометричних характеристик виконується за критерієм міцності.

Для математичного очікування критичного фактору використаємо формулу

$$m_K = [m_N / A_0 + m_M / W_x] / m_R = \frac{1,62}{h t_w \psi_A} \cdot \frac{m_{q,\max}}{m_R} \cdot \left[ 1 + 22,7 \frac{\psi_A}{h \psi_{J,x}} \right] \quad (33)$$

Відповідно до (4)  $m_K$  також можна виразити як

$$m_K = 1 / [1 + 0,84 V_{q,\max} (y - 0,68)] \quad (34)$$

Обчислюємо статистичні характеристики випадкової величини максимумів випадкового процесу снігового навантаження. Для цього задаємося періодом експлуатації  $T_{ef} = 20$  років та обчислимо проміжні величини.

Характеристичний максимум отримаємо з рівняння

$$C_0 + C_1 \gamma_0 + C_2 \gamma_0^2 + C_3 \gamma_0^3 = \ln \left( \frac{\sqrt{2\pi}}{\omega_{e,s} T_{ef} K_s} \right) \quad (35)$$

$$\gamma_0 = 1,251$$

де  $\omega_{e,q} = 0,14$  день<sup>-1</sup> – ефективна частота,  $K_s = 0,1$  – безрозмірний коефіцієнт корегування;  $C_0 = -4,116$ ;  $C_1 = -6,748$ ;  $C_2 = 8,355$ ;  $C_3 = -2,160$  – коефіцієнти полінома (всі числові величини наведені для третього снігового району).

Характеристична інтенсивність

$$\lambda_0 = -(C_1 + 2C_2 \gamma_0 + 3C_3 \gamma_0^2) = 4,445 \quad (36)$$

Параметр масштабу

$$\alpha_n = \lambda_0 / (m_q \cdot V_q) = 0,012 \text{ Па}^{-1}, \quad (37)$$

де  $m_q = 200$  Па – математичне очікування та  $V_q = 1,8$  – коефіцієнт варіації для третього снігового району.

Параметр положення

$$u_n = m_q(1 + V_q \gamma_0) = 650 \text{ Па.} \quad (38)$$

Остаточо отримаємо

$$\sigma_{q,\max} = 1,282/\alpha_n \approx 104 \text{ Па,} \quad (39)$$

$$m_{q,\max} = u_n + 0,577/\alpha_n = 697 \text{ Па,} \quad (40)$$

$$V_{q,\max} = 1,282/(\alpha_n u_n + 0,577) = 0,15 \quad (41)$$

Задамо значення нормативної імовірності роботи  $F_\gamma = 0,999$ , яка відповідає безрозмірному показнику надійності  $\gamma_F = -\ln[-\ln(F_\gamma)] \approx 6,91$  та з (24) отримаємо числову оцінку необхідного математичного очікування  $m_k \approx 0,56$ .

Припустмо, що співвідношення (15) ширини полицки до висоти швелера  $\alpha_1 = 0,25$ . Відповідно до (17) і (19)

отримаємо  $\psi_A = 2,5$ ,  $\psi_{J,x} = 0,292$ . Використавши формулу (33), отримаємо:

$$1 + 428/h = 5,6ht_w,$$

$$h \approx 0,1 \cdot [1 + \sqrt{1 + 9587t_w}] / t_w.$$

### Висновки

1. Наведено узагальнений алгоритм аналітичного імовірнісного розрахунку елементів сталевих ємностей зберігання.
2. Відповідно до формульного виразу здійснено числовий розрахунок імовірності безвідмовної роботи надійності кільцевого ребра жорсткості циліндричної ємності.
3. Розв'язано практичну задачу підбору поперечного перерізу радіального ребра жорсткості за заданим рівнем нормативної імовірності роботи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вероятностные методы в строительном проектировании : монография / [Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати]. – Москва : Стройиздат, 1988. – 584 с.
2. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений : монография / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1982. – 351 с.
3. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения : монография / Е. С. Вентцель. – Москва : Высшая школа, 2000. – 383 с.
4. Кінаш Р. І. Снігове навантаження в Україні : монографія. / Р. І. Кінаш. – Львів : Вид-во науково-технічної літери, 1997. – 848 с.
5. Махінко Н. О. До розрахунку надійності елементів сталевих ємностей зберігання / Н. О. Махінко // Вісник ПДАБА. – 2018. – № 6. – С. 71–77.
6. Махінко Н. О. Розрахунок напружено-деформованого стану конусних покрівель при симетричному навантаженні / Н. О. Махінко // Вісник ПДАБА. – Дніпро, 2018. – Вип. 1. – С. 74 – 83.
7. Рекомендації із розрахунку надійності сталевих елементів конструкцій на дію снігового та вітрового навантажень (до ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи») / [С. Ф. Пічугін, А. В. Махінко, Н. О. Махінко]. – Полтава : АСМІ, 2007. – 115 с.
8. Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014. [Чинний від 2015-01-01]. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
9. Casciati F. Mathematical Models for Structural Reliability Analysis / [F. Casciati, B. Roberts] – USA : CRC Press, 1996. – 384 p.
10. Lemaire M. Structural Reliability / M. Lemaire. – London, UK : ISTE Ltd, 2009. – 504 p.

### REFERENCES

1. Augusti G., Baratta A. and Kashiati F. *Veroyatnostnye metody v stroitel'nom proektirovanii* [Probabilistic methods in building design]. Moscow : Stroiizdat, 1988, 584 p. (in Russian).
2. Bolotin V.V. *Metody teorii veroiatnostei i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii* [Methods of the theory of probability and the theory of reliability in the calculations of structures]. Moscow : Stroiizdat, 1982, 351 p. (in Russian).
3. Venttsel E.S. *Teoriia sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniia* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow : High School, 2000, 383 p. (in Russian).
4. Kinash R.I. *Snigove navantazhennya v Ukraini* [Snow load in Ukraine]. Lviv : Scientific-Technical Year, 1997, 848 p. (in Ukrainian).

5. Makhinko N.O. *Do rozrahunku nadijnosti elementiv stalevih emnostej zberigannya* [To calculate the reliability of elements of steel storage tanks]. *Visnik PDABA* [Bulletin of the PSACEA]. 2018, no. 6, pp. 71–77. (in Ukrainian).
6. Makhinko N.O. *Rozrakhunok napruzhenno-deformovanoho stanu konusnykh pokrivel pry symetrychnomu navantazhenni* [Calculation of the deflected mode of conical roofs under the symmetric load ]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of PSACEA]. 2018, no. 1, pp. 74–83. (in Ukrainian).
7. Pichugin C.F., Makhinko A.V. and Mahinko N.A. *Rekomendacii iz rozrahunku nadijnosti stalevih elementiv konstrukcij na diyu snigovogo ta vitrovogo navantazhen' (do DBN V.1.2-2:2006 «Navantazhennya i vplivi»)* [Recommendations on the calculation of the reliability of steel elements of structures on the effect of snow and wind loads (to SBS B.1.2-2: 2006 "Load and Impact")]. Poltava : ASMI, 2007, 115 p. (in Ukrainian).
8. *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia : DBN V.2.6-198:2014* [Steel structures. Design standards : SBS V.2.6-198:2014]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014, 199 p. (in Ukrainian).
9. Casciati F. and Roberts B. *Mathematical Models for Structural Reliability Analysis*. USA, CRC Press, 1996, 384 p.
10. Lemaire M. *Structural Reliability*. London, UK, ISTE Ltd, 2009, 504 p.

Надійшла до редакції: 15.02.2019 р.

УДК 517.11+519.92+539.3

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.89.410

## ОЦІНКА РЕСУРСУ КОНСТРУКЦІЇ З ТРІЩИНОЮ НОРМАЛЬНОГО РОЗРИВУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

ВОЛЧОК Д. Л., канд. техн. наук, доц.

Кафедра будівельної механіки та опору матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (056) 756-33-51, e-mail: [Denys.L.Volchok@gmail.com](mailto:Denys.L.Volchok@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

**Анотація.** Розглядаються питання оптимального проектування конструкції (ОПК), що працює в умовах обмежень міцності, стійкості та жорсткості. Як додаткове обмеження розглядається можливість присутності тріщини в розтягнутому елементі. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі методом динамічного програмування. Отримано чисельно-аналітичний розв'язок у вигляді рекурентних формул. Крім детермінованого розв'язання ОПК пропонується ситуація, коли існує тріщина нормального розриву. Величина розміру тріщини задається нечітким чином. Оцінюється вплив нечіткого завдання початкової довжини тріщини для окремого елемента конструкції на кількість циклів навантаження за умови неруйнування. Для ферми, що складається з чотирьох елементів в детермінованій постановці оцінено вплив наперед заданої точності розрахунку на збіжність процесу при розв'язанні задачі ОПК методом динамічного програмування. Для випадку достатньої наперед заданої точності для ферми виконано пошук впливу величини довжини тріщини на площі поперечних перетинів стержнів та об'єм конструкції. Проведено числові експерименти впливу нечіткого завдання довжини тріщини при різних значеннях розкиду для її модального значення на об'єм конструкції. **Висновок.** Збіжність розв'язання починається тоді, коли відносна похибка приблизно дорівнює 0,003. Побудовані залежності об'єму стержневої конструкції від довжини тріщини показують його значне зростання після величини довжини тріщини 15 см у детермінованій задачі. Дослідження показує принципову можливість використання теорії нечітких множин в задачах оптимального проектування шарнірно-стержневих систем. Як приклад, у процедурі було використано число з трикутною формою функції приналежності. Такі етапи, як фазифікація, оптимальне проектування і дефазифікація, дозволяють оцінити результат нечіткої задачі. Таким чином, у статті показано результат можливого значення об'єму для ситуації, коли модальне значення довжини тріщини становить 25 мм, а відхилення має область від 0 до 20 %.

**Ключові слова:** шарнірно-стержнева система; оптимальне проектування; динамічне програмування; нечітке моделювання; фазифікація; дефазифікація

## ОЦЕНКА РЕСУРСА КОНСТРУКЦИИ С ТРЕЩИНОЙ НОРМАЛЬНОГО РАЗРЫВА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ВОЛЧОК Д. Л., канд. техн. наук, доц.

Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днiпро, 49600, Украина, тел.+38 (056) 756-33-51, e-mail: [Denys.L.Volchok@gmail.com](mailto:Denys.L.Volchok@gmail.com), ORCIDID: 0000-0002-7914-321X

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы оптимального проектирования конструкции (ОПК), работающей в условиях ограничений по прочности, устойчивости и жесткости. Как дополнительное ограничение рассматривается возможность присутствия трещины в растянутом элементе. Предложен алгоритм решения задачи методом динамического программирования. Получено численно-аналитическое решение в виде рекуррентных формул. Кроме детерминированного решения ОПК предлагается ситуация, когда существует трещина нормального разрыва. Величина размера трещины задается нечетким образом. Оценивается влияние нечеткого задания начальной длины трещины для отдельного элемента конструкции на количество циклов нагружения при неразрушении. Для фермы, состоящей из четырех элементов, в детерминированной постановке оценено влияние заранее заданной точности расчета на сходимость процесса при решении задачи ОПК методом динамического программирования. Для случая достаточной заранее заданной точности для фермы выполнен поиск влияния величины длины трещины на площади поперечных сечений стержней и объем конструкции. Проведены численные эксперименты влияния нечеткого задания длины трещины при различных значениях разброса для её модального значения на объем конструкции.

**Ключевые слова:** шарнирно-стержневая система; оптимальное проектирование; динамическое программирование; нечеткое моделирование; фазификація; дефазификація

## ESTIMATION OF THE RESOURCE OF A STRUCTURE WITH THE TENSILE CRACK ON THE BASIS OF FUZZY SIMULATION

VOLCHOK D.L., *Cand. Sc.(Tech), Ass. Prof.*

Department of structural mechanics and strength of materials, State Higher Educational Institution "Prydnipravska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-51, e-mail: [Denys.L.Volchok@gmail.com](mailto:Denys.L.Volchok@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

**Abstract. Statement and solution of the problem.** The problems of optimal design of structure, which is operated under the constraints of strength, stability and rigidity are considered. As an additional restriction, the possibility of the crack presence in a stretched element is considered. With a small, compared with the yield strength, destructive stress, the construction element is in critical condition. So that, the calculation of strength can be carried out according to the well-known Irwin criterion of a linear destructive mechanics. An algorithm for solving the optimal design problem using dynamic programming is proposed. A numerical-analytical solution is obtained in the form of recurrent formulas. In addition to the deterministic optimal design solution there is a situation where a tensile crack in the rod of the truss is considered. The size of the crack is not clearly defined. The influence of the fuzzy problem of the initial crack length on the number of load cycles during non-destruction for separate elements of the structure is estimated. The truss consists of four elements in a deterministic formulation. The effect of a predetermined accuracy of calculation on the convergence of the process, when the optimal design problem is solved with using dynamic programming, is estimated. For the case of sufficient predetermined accuracy for the truss, a search was made for the influence of the length of the crack on the cross-sectional area of the rods and the volume of the structure. Numerical experiments of the influence of the fuzzy problem of the crack length for different values of the modal value spread on the volume of the structure are carried out. **Conclusion.** Convergence of the solution starts when relative error is approximately equal 0.003. Influence of crack length on the volume of rod structure shows its growing after the value of 15 cm in deterministic problem. Investigation shows the principle possibility of the theory of fuzzy sets using in problems of optimal design of hinged-rod systems. As an example, the fuzzy numbers with triangular form of membership function were used in the procedure. The stages such as fuzzification, optimal design and defuzzification let us estimate the result of fuzzy problem. So, the result of the possible value of volume for situation, when modal value of crack length is 25 mm and deviation has different domain, is shown in the article.

**Keywords:** *hinged-rod system; optimal design; dynamic programming; fuzzy simulation; fuzzification; defuzzification*

**Вступ.** Сучасний рівень розвитку механіки руйнування, теорії надійності дає змогу оцінити працездатність елементів конструкції з урахуванням невизначеності впливу силових факторів, геометричних і механічних характеристик, процесів розвитку макротріщини та довговічності. В механіці, як правило, розглядається невизначеність стохастичної природи. Але останнім часом, крім такої, з'явилась можливість уведення інших видів невизначеності, таких як нечіткість і неточність [7].

Нечіткість припускає опис вихідних параметрів за допомогою дескрипторів виду «приблизно», «близько до», «мабуть», «в інтервалі» та інше, а неточність - опис параметрів за допомогою інтервалів з їх неточними межами. Для роботи з такими об'єктами в самому кінці минулого сторіччя виник у математиці новий напрямок - теорія нечітких і неточних множин [6; 8] – методи «м'яких обчислень».

### 1. Детермінована задача оптимального проектування статично визначеної ферми.

Запишемо таку задачу ОПК пошуку об'єму та площ поперечних перерізів, у якій обмеженнями виступають умова жорсткості, міцності та стійкості:

$$(V^*, A^*) = \arg \left\{ \min_{A \in \Omega} V(A) \mid y_j(A) \leq [y] \leq y^{\max}; \sigma_i(A) \leq R_i^* \right\}$$
$$A = (A_1, A_2, \dots, A_n); \quad (1)$$

де:

$V$  - об'єм пружної системи;

$A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ ;

- вектор, компоненти якого є площі перерізів;

$y^{\max}$

- максимальне значення переміщення вузла для випадку, коли перерізи стержнів розраховуються із умов міцності;

$R_0$  - розрахунковий опір;

$\varphi$  - коефіцієнт повздовжнього згину;

$n$  - число стержнів в фермі;

$j$  - номер вузла, переміщення вертикальне (горизонтальне) якого обмежене величиною  $[y]$ .

Переміщення в ШСС  $j$  вузла (обмеження по жорсткості) визначаються за формулою Мора:

$$y_j = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{A_i}; D_i = \frac{N_i \bar{N}_i l_i}{E}, \quad (2)$$

де  $N_i, \bar{N}_i$  - зусилля в  $i$ -ому стержні відповідно від дії зовнішнього навантаження  $P$  і одиничного навантаження, прикладеного в  $j$ -ому вузлі.

$$\sigma_i = \frac{|N_i|}{A_i}; R_i^* = \begin{cases} R_0, N_i > 0 \\ \phi R_0, N_i < 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Як бачимо з (3), обмеження на міцність працюють для розтягнутих стержнів і на стійкість для стиснутих стержнів.

## 2. Модель руйнування розтягнутого елемента за наявності тріщини.

Припущення про можливість нормального функціонування силової конструкції за наявності тріщини спричинило розвиток методів розрахунку на тріщиностійкість та живучість. За невеликих, порівняно з границею текучості, руйнівних напружень елемент конструкції перебуває в критичному стані. І тому розрахунок на міцність можна вести за відомим критерієм Ірвіна лінійної механіки руйнування:

$$K \leq K_{IC}, \quad (4)$$

де  $K$  - коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), а  $K_{IC}$  - його критичне значення - в'язкість руйнування за плоского деформування. У крихкому стані за допомогою коефіцієнта  $K_{IC}$  зв'язують руйнівне навантаження і критичну довжину  $a_*$  тріщини таким співвідношенням  $K = K_{IC}$ . Коефіцієнт КІН подається виразом [5]:

$$K(a) = \sigma \sqrt{\pi a} Y(\lambda); Y(\lambda) = 1.12; \lambda = \frac{a}{b} < 0.7,$$

де  $a$  - характерний розмір (довжина) тріщини;  $\sigma$  - параметр навантаження - значення нормального напруження;  $Y(\lambda)$  - функція геометрії тріщини;  $b$  - ширина полоси з поперечною тріщиною за осьового розтягнення.

Полоса (рис. 1) розглядається як елемент конструкції, з крайовою поперечною тріщиною нормального розриву, що розтягнута силами, які еквівалентні нормальним напруженням  $\sigma^{\max}$  і  $\sigma^{\min}$  в межах одного циклу. За дії змінного навантаження сталий ріст тріщини описується рівнянням Периса [5]:

$$\frac{da}{dN} = f(a, \sigma), \quad (5)$$

де  $N$  - число циклів навантаження.

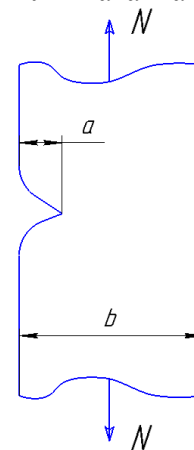


Рис. 1. Полоса з крайовою поперечною тріщиною нормального розриву / Fig. 1. Band with boundary transverse crack of normal rupture

Умова відмови, що означає перехід конструкції в непрацездатність, має вигляд  $a|_{N=N^*} = a_*$ , де  $N^*$  - число циклів навантаження (ресурс конструкції), за яке тріщина збільшить свою довжину від  $a_0 = a|_{N=0}$  до  $a_*$ . Розв'язання диференціального рівняння (5) з урахуванням граничних умов дає

$$N^* = \frac{2}{\beta(2-n)} (\sqrt{a^{2-n}} - \sqrt{a_0^{2-n}}), \beta = A(1.12\sqrt{\pi}\Delta\sigma)^n, \quad (6)$$



де  $n, A$  - емпіричні коефіцієнти. Критична довжина тріщини подається таким виразом:

$$a_* = \left( \frac{K_{IC}}{1.12\sqrt{\pi\sigma_{\max}}} \right)^2 \quad (7)$$

### 3. Визначення області допустимих розв'язків у задачі ОПК.

У результаті синтезу обмежень задачі ОПК ферми (1) та нових обмежень (4), отриманих із моделі неруйнування розтягнутого елемента, визначимо область допустимих розв'язків. З умови міцності для  $i$ -го елемента маємо:

$$\sigma_i = \frac{|N_i|}{A_i} \leq R_i^* \rightarrow A_i^0 = \frac{|N_i|}{R_i^*} \quad (8)$$

З умови неруйнування маємо:

$$1.12 \frac{|N_i|}{A_i} \sqrt{\pi a_0} \leq K_{IC} \rightarrow A_i^* = 1.12 \frac{|N_i|}{K_{IC}} \sqrt{\pi a_0} \quad (9)$$

Область  $\Omega_i$  допустимого розв'язку

$$\Omega_i = \{A_i \mid A_i \geq A_i^- = \max(A_i^0, A_i^*)\} \quad (10)$$

Пошук  $\{A_i\}$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$  виконується за допомогою методу динамічного програмування при виконанні умови жорсткості [1; 3].

### 4. Метод динамічного програмування.

Уведемо до розгляду функцію Беллмана

$$f_i(d_i) = \min_{A_i, A_{i+1}, \dots, A_n} \sum_{j=i}^n l_j A_j \quad (11)$$

- мінімальне значення об'єму ШСС в припущенні, що процес пошуку  $\{A_i^{opt}\}$ ;  $j = i, i+1, \dots, n$  починається з елемента  $j=i$  і закінчується елементом  $j=n$ . Аргументом цієї функції є величина «ресурсу»  $d_i$ , яка пов'язана зі змінною проектування  $A_i$  таким співвідношенням

$$d_i = \sum_{j=i}^n D_j / A_j; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad 0 \leq d_i \leq [y]. \quad (12)$$

Із означення (12) випливає

$$d_i = \frac{D_i}{A_i} + \sum_{j=i+1}^n D_j / A_j \rightarrow d_i = \frac{D_i}{A_i} + d_{i+1}$$

звідки маємо:

$$d_{i+1} = d_i - \frac{D_i}{A_i} \quad (13)$$

За означення (11) з урахуванням (13) побудуємо на основі принципу Беллмана [3] таке рівняння:

$$f_i(d_i) = \min_{A_i} \left[ l_i A_i + \min_{A_{i+1}, A_{i+2}, \dots, A_n} \sum_{j=i+1}^n l_j A_j \right] \rightarrow$$

$$f_i(d_i) = \min_{A_i} [l_i A_i + f_{i+1}(d_{i+1})]$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1; \quad d_1 = [y]; \quad f_{n+1}(d_{n+1}) \equiv 0 \quad (14)$$

Вираз (14) є основним функціональним рівнянням методу динамічного програмування. За термінологією цього методу  $d_i^-$  є змінна стану,  $A_i^-$  є змінною керування.

За роботою (5) наведено аналітично-числову процедуру динамічного програмування, яка побудована на основі послідовних наближень.

Для  $i=n$  із означень (12) і (13) маємо:

$$d_n = D_n / A_n; \quad A_n = D_n / d_n \quad (15)$$

$$f_n(d_n) = \min_{A_n} l_n A_n = l_n D_n / d_n \quad (16)$$

Розглянемо випадок, коли  $i = n-1$ . Рівняння (14) для цього випадку перепишемо у вигляді:

$$f_{n-1}(d_{n-1}) = \min_{A_{n-1}} [l_{n-1} A_{n-1} + f_n(d_n)];$$

$$d_n = d_{n-1} - D_{n-1} / A_{n-1} \quad (17)$$

Рівняння (17) з урахуванням означення (16) буде таким:

$$f_{n-1}(d_{n-1}) = \min_{A_{n-1}} \left[ l_{n-1} A_{n-1} + \frac{l_n D_n}{d_{n-1} - D_{n-1} / A_{n-1}} \right]$$

Виконуючи далі аналогічні дії для  $i = n-2, n-3, \dots, 1$  методом математичної індукції отримаємо таке рівняння:

$$f_i(d_i) = \min_{A_i} H(A_i), \quad (18)$$

де:

$$H(A_i) = l_i A_i + T_i + \frac{D_n l_n}{d_i - S_i^* - D_n / A_i};$$

$$T_i = \sum_{j=i}^{n-1} l_j A_j \text{ для } i = 1, 2, \dots, n-2;$$

$$S_i^* = \begin{cases} \sum_{j=i}^{n-1} D_j / A_j^* \text{ для } i = 1, 2, \dots, n-2; \\ 0, \text{ для } i = n-1. \end{cases}$$

Із необхідних умов існування екстремуму визначимо шуканий переріз  $A_i$ :

$$A_i^0 = (D_{ik} + \sqrt{l_n D_{nk} D_{ik} / l_i}) / a_i^*; i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (19)$$

$$A_n^0 = D_{nk} / d_n.$$

Оптимальний розв'язок при цьому формулюється як

$$A_i^{opt} = \begin{cases} A_i^0, & A_i^0 > A_i^- \\ A_i^-, & A_i^0 \leq A_i^- \end{cases} \quad (20)$$

### 5. Числова ілюстрація оцінки ресурсу елемента конструкції з тріщиною.

Нехай матеріал елемента конструкції в прикладі виготовлено із сталі А514, має

$$\sigma_T = 700 \text{ Н / мм}^2$$

характеристики

$$K_{IC} = 5300 \text{ Н} \cdot \text{мм}^{3/2}$$

Параметри циклу

$$\sigma_{max} = 320 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$$

навантаження нехай будуть

$$\sigma_{min} = 175 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$$

. За роботою [4] візьмемо експериментальні значення емпіричних коефіцієнтів  $A = 3.553 \cdot 10^{-13}$  та  $n = 2.95$ .

Нехай величина довжини тріщини задається як «приблизно» дорівнює 7,6 мм. Фазифікація цього висловлювання здійснюється на основі функції належності трикутного виду [2].

Розглянемо три випадки завдання нечіткого числа:

$$a_0(6.1; 7.6; 9.1)_\Delta, a_0(7; 7.6; 8.5)_\Delta, a_0(7.4; 7.6; 8)_\Delta$$

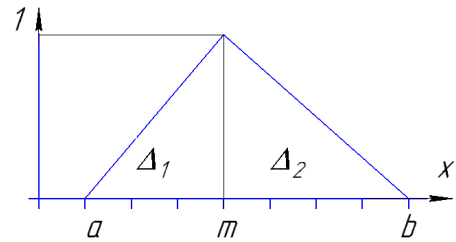


Рис. 2. Інформаційна гранула нечіткої величини, розподілена за трикутним законом / Fig. 2. Information granule of fuzzy value, distributed by triangular law

Використовуючи (6), (7) знайдемо відповідні нечіткі числа - кількість циклів навантаження:

$$N(95741; 81889; 71570)_\Delta$$

$$N(86901; 81889; 75374)_\Delta$$

$$N(83493; 81889; 78860)_\Delta$$

Етап дефазифікації нечітких чисел [7] дозволяє отримати прогнозовані значення кількості циклів відповідно  $N^{def} = 80271$ ,  $N^{def} = 81513$ ,  $N^{def} = 81532$  та порівняти їх із числом циклів, отриманим при детермінованому (чіткому) значенні довжини тріщини  $N = 81889$ . Таким чином, розбіжність із детермінованим значенням складає від 0.4 до 2 %.

### 6. Числова ілюстрація оптимального проектування ферми.

Розглянемо чотири-елементну статично визначену ферму, схема якої наведена на рисунку 2. Основні геометричні

характеристики ферми будуть:  $l_1 = 1000\sqrt{2}$  мм,  $l_2 = l_3 = 1000$  мм,  $l_4 = 500\sqrt{2}$  мм.

Навантаження на ферму буде  $P_1 = 4$  кН.

$P_2 = 4$  кН. Для подальших розрахунків

візьмемо модуль пружності  $E = 207 \frac{\text{кН}}{\text{мм}^2}$ ,

розрахунковий опір  $R_0 = 0.15 \frac{\text{кН}}{\text{мм}^2}$ ,  $\varphi = 0.6$ ,

початкову площу перерізів  $A_i \approx 100$  мм<sup>2</sup>;

$i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n = 4$ ;  $j = 1$ ;

Допустиме переміщення  $[u]_{\text{доп}} = 1.6$  ; та  
 максимальне переміщення  $u_{\text{макс}} = 3.41$  ;

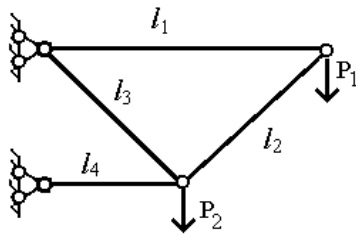


Рис. 3. Схема ШСС / Fig. 3. Scheme of the ShSS

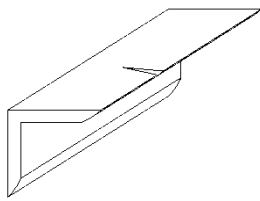


Рис. 4. Кутник із тріщиною / Fig. 4. Corner with a crack

### 6.1. Детермінований випадок. Збіжність процедури.

Для оцінювання достатньої точності розрахунків ШСС (рис. 3) за пропонуваним підходом оптимальний проект (об'єм та площа перерізів) від заданої наперед точності розв'язку для випадку конструкції без крайової тріщини нормального розриву наведено на рисунках 5 та 6, із яких видно, що процес наближення за функціоналом  $V^{\text{opt}}$  і розв'язком  $A_i^{\text{opt}}$ ;  $i = \overline{1, 4}$  майже однаковий, що робить пропонувану процедуру достовірною. Для подальших розрахунків вибирається точність  $\varepsilon = 10^{-9}$ .

### 6.2. Оптимальне проектування за наявності тріщини довжиною $a_0$ .

Нехай ферма має крайову тріщину нормального розриву довжиною  $a_0$  в розтягнутому елементі  $l_3$  (рис. 3, 4). В такому випадку до умов жорсткості, міцності та стійкості додається умова неруйнування конструкції. Залишаючи геометричні, механічні параметри ферми та навантаження незмінними, обчислимо оптимальний об'єм конструкції залежно від  $a_0$  (рис. 7). Пошук виконано при

$K_{IC} = 5300 \text{ H} \cdot \text{мм}^{3/2}$ . Як бачимо, об'єм від величини довжини тріщини починає зростати відносно оптимального проекту без тріщини  $V_{\text{макс}}^* = 519805$  <sup>3</sup>.

Аналізуючи зміну оптимального значення площ перерізів (рис. 8) бачимо, що з деякого моменту величина оптимальної площі третього стержня починає зростати, а величини площ інших стержнів зменшуватись відносно розв'язання оптимального проекту без тріщини  $A_{1\text{макс}}^0 = 79.23$  <sup>2</sup>,  $A_{2\text{макс}}^0 = 112.05$  <sup>2</sup>,  $A_{3\text{макс}}^0 = 158$  <sup>2</sup>,  $A_{4\text{макс}}^0 = 194.08$  <sup>2</sup>. Пояснити це можна тим, що починає впливати на результат умова жорсткості.

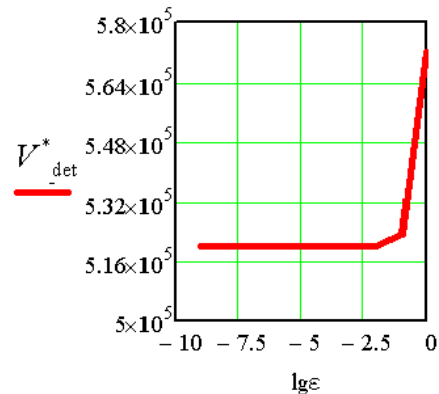


Рис. 5. Збіжність об'єму  $V_{\text{det}}^*$ ,  $A_{\text{det}}^{4*}$  від заданої точності  $\varepsilon$  / Fig. 5. Convergence of the volume  $V_{\text{det}}^*$ ,  $A_{\text{det}}^{4*}$  from the given accuracy  $\varepsilon$

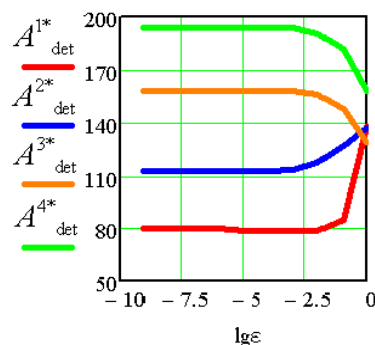


Рис. 6. Збіжність площ перерізів стержнів  $A_{\text{det}}^{1*}$ ,  $A_{\text{det}}^{2*}$ ,  $A_{\text{det}}^{3*}$ ,  $A_{\text{det}}^{4*}$  від заданої точності  $\varepsilon$  / Fig. 6. Convergence of the cross-sectional areas of the rods  $A_{\text{det}}^{1*}$ ,  $A_{\text{det}}^{2*}$ ,  $A_{\text{det}}^{3*}$ ,  $A_{\text{det}}^{4*}$  from the given accuracy  $\varepsilon$

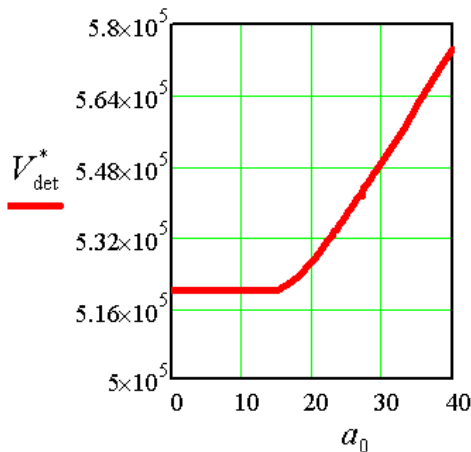


Рис. 7. Вплив довжини тріщини  $a_0$ , (мм) на характеристику оптимального проекту  $V^*_{det}$ , (мм<sup>3</sup>) / Fig. 7. Effect of the crack length  $a_0$ , (mm) on the characteristic of the optimal project  $V^*_{det}$ , (mm<sup>3</sup>)

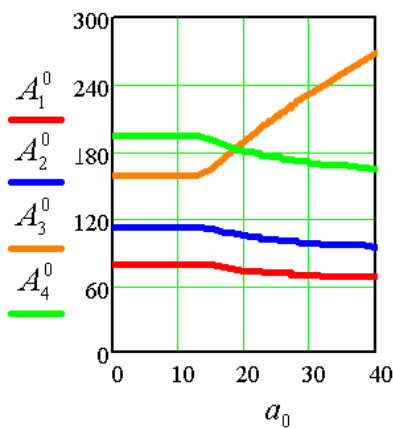


Рис. 8. Вплив довжини тріщини  $a_0$ , (мм) на характеристики оптимального проекту – площі перерізів (мм<sup>2</sup>) / Fig. 8. Effect of crack length  $a_0$ , (mm) on the characteristics of the optimal project – section area (mm<sup>2</sup>)

### 6.3. Нечітке моделювання ШСС із тріщиною.

Нехай величина довжини крайової тріщини в третьому стрижні ферми подано нечітким чином із функцією належності трикутного виду (рис. 2) і її мода дорівнює  $a_{det} = 25$  мм. Розкид нечіткої величини для чотирьох експериментів наведено в таблиці 1.

Проводячи етапи фазифікації, оптимізації та дефазифікації, отримуємо величини оптимального об'єму в (табл.). Як бачимо, з ростом невизначеності зростає і дефазифікована величина об'єму конструкції  $V^*_{def}$ . Графа  $\Delta_{V^*_{def}}\%$  таблиці показує відсоток відхилення отриманого об'єму від об'єму у

випадку без тріщини. Графічні подання результатів приведемо на рисунку 9 ( $V^*_{det} = 537\,248$  мм<sup>3</sup> за модального значення довжини тріщини  $a_{det} = 25$  мм).

Таблиця

**Вплив нечіткого завдання довжини тріщини на об'єм ферми / Influence of fuzzy length problem cracks on the volume of the farm**

№	$\Delta\%$	$a$ , мм	$b$ , мм	$V^*_{\Delta}$ , мм <sup>3</sup>	$V^*_{def}$ , мм <sup>3</sup>
1	0	0	0	(0; 537248; 0)	537248
2	0.5	24.875	25.125	(536959; 537248; 537538)	537248
3	1	24.75	25.25	(536671; 537248; 537829)	537249
4	5	23.75	26.25	(534399; 537248; 540181)	537269
5	10	22.5	27.5	(531658; 537248; 543179)	537333
6	15	21.25	28.75	(529055; 537248; 546225)	537444
7	20	20	30	(526631; 537248; 549309)	537609

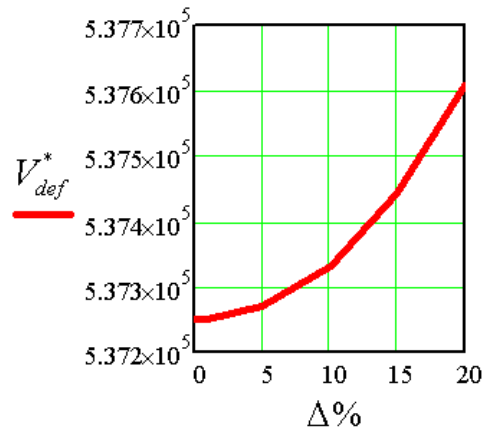


Рис. 9. Графічна інтерпретація впливу нечіткого завдання довжини тріщини на величину оптимального об'єму матеріалу чотирьох елементів ферми / Fig. 9. Graphic interpretation of the effect of fuzzy problem of crack length on the value of the optimal volume of material of four elements of the farm

**Висновки.** Показано принципову можливість використання теорії нечітких множин у задачах оптимального проектування ШСС. Отримано результати

можливого значення об'єму для випадку, коли можлива присутність тріщини з модальним значенням довжини  $a_{det} = 25$  мм для різних випадків збільшення нечіткості.

Для детермінованої постановки задачі отримано залежність впливу величини

довжини тріщини на оптимальні значення площ поперечних перерізів ШСС та оптимального об'єму за умови виконання обмежень на жорсткість, міцність, стійкість та неруйнування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бараненко В. А. Динамическое программирование и последовательные приближения / В. А. Бараненко // Придніпровський науковий журнал. Фізико-математичні науки. – № 112. – 1998. – С. 38–44.
2. Бараненко В. А. Нечітке моделювання в оптимальному проектуванні шарнірно-стержневих систем / В. А. Бараненко, Д. Л. Волчок // Опір матеріалів і теорія споруд. – Вип. 100. – Київ. – 2018. – С. 71–93.
3. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. Под редакцией А. А. Первозванского. – Москва : Наука, 1965. – 460 с.
4. Партон В. З. Механика разрушения. От теории к практике : монография / [ Партон В. З.]. – Москва : Наука, 1990 – 240 с.
5. Broek D. Elementary Engineering Fracture Mechanics / [D. Broek] // Alphen aan den Rijn, Sijthoff & Noordhoff, 1978. – XIII. – 437 p.
6. Kaufmann A. Introduction à la théorie des sous-ensembles flous : à l'usage des ingénieurs: (Fuzzy sets theory) / [A. Kaufmann]. – Paris : Masson et C-іe, 1977. – 235 p.
7. Liu B. Theory and practice of Uncertain programming / B. Liu. – Berlin, Springer-Verlag, 2009. – 201 p.
8. Pawlak Z. Rough sets : Theoretical Aspects of Reasoning about Data / Z. Pawlak // Kluwer Academic Publishers. – Dordrecht, 1991. – 224 p.

### REFERENCES

1. Baranenko V.A. *Dinamicheskoe programmirovaniye I posledovatelnyye priblizheniya* [Dynamic programming and sequential approximations]. *Pridniprovs'kij naukovij zhurnal. Fiziko-matematichni nauki* [Prydniprovsky scientific journal. Physics and Mathematics]. No. 112, 1998, pp. 38–44 (in Russian).
2. Baranenko V.A. and Volchok D.L. *Nechitke modelyuvannya v opty'mal'nomu proektuvanni sharnirno-sterzhnevuy`x sy'stem* [Fuzzy simulation in optimal design of hinge-rod systems]. *Opir materialiv i teoriya sporud* [Strength of Materials and Theory of Structures]. Kyiv, vyp. 100, 2018, pp. 71–93 (in Ukrainian).
3. Bellman R. and Dreyfus S. *Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applied problems of dynamic programming]. Edited by A.A. Pervozvanskyi. Moscow : Nauka Publ., 1965, 460 p. (in Russian).
4. Parton V.Z. *Mehanika razrusheniya. Ot teorii k praktike* [Fracture mechanics. From theory to practice.]. Moscow : Nauka Publ., 1990, 240 p. (in Russian).
5. Broek D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. Alphen aan den Rijn, Sijthoff & Noordhoff, 1978. XIII, 437 p.
6. Kaufmann A. Introduction à la théorie des sous-ensembles flous : à l'usage des ingénieurs: (Fuzzy sets theory) Paris : Masson et C-іe, 1977, 235 p.
7. Liu B. Theory and practice of Uncertain programming, Berlin, Springer-Verlag, 2009, 201 p.
8. Pawlak Z. Rough sets : Theoretical Aspects of Reasoning about Data. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991, 224 p.

Надійшла до редакції: 21.02.2019 р.

УДК 69.055 : 69.003

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.94.411

## РАСЧЁТ ОКУПАЕМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

ГОНЧАРЕНКО Д. Ф.<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, профессор,  
МЕНЕЙЛЮК И. А.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1\*</sup> Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, 61002, Харьков, Украина, e-mail: [gonch@kstuca.kharkov.ua](mailto:gonch@kstuca.kharkov.ua)

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, 61002, Харьков, Украина, e-mail: [meneyiv@gmail.com](mailto:meneyiv@gmail.com)

**Аннотация. Постановка проблемы.** Объем возведения гражданских зданий в Украине постоянно растёт, при этом условия их строительства более сложные по сравнению с другими видами строительства. В изученной нормативной и справочной литературе не найдено исчерпывающих системных рекомендаций по выбору организационных и финансовых решений по указанной теме. Высокий социальный, экономический и технический эффект решения проблемы выбора рациональных организационных решений при гражданском строительстве обуславливает высокую актуальность темы исследования. **Цель статьи** - разработать методику и представить результаты расчёта окупаемости варианта строительства жилого комплекса, наиболее эффективного по критериям продолжительности и бюджета, в условиях организационных ограничений. **Вывод.** Предложенная методика может использоваться для других проектов строительства жилого комплекса, а построенные экспериментально-статистические зависимости позволили ввести ограничения и определить наиболее эффективный вариант организации строительства.

**Ключевые слова:** организация строительства; гражданское строительство; жилой комплекс; продолжительность; бюджет

## РОЗРАХУНОК ОКУПНОСТІ БУДІВНИЦТВА ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ В УМОВАХ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

ГОНЧАРЕНКО Д. Ф.<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, професор,  
МЕНЕЙЛЮК І. О.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1\*</sup> Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, 61002, Харків, Україна, e-mail: [gonch@kstuca.kharkov.ua](mailto:gonch@kstuca.kharkov.ua)

<sup>2</sup> Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, 61002, Харків, Україна, e-mail: [meneyiv@gmail.com](mailto:meneyiv@gmail.com)

**Анотація. Постановка проблеми.** Обсяг зведення цивільних будинків в Україні постійно зростає, при цьому, умови зведення цивільних будинків є більш складними в порівнянні з іншими видами будівництва. У вивченій нормативній та довідковій літературі не було знайдено вичерпних системних рекомендацій з вибору організаційних і фінансових рішень із зазначеної теми. Високий соціальний, економічний і технічний ефект вирішення проблеми вибору раціональних організаційних рішень при цивільному будівництві обумовлює високу актуальність теми дослідження. **Мета.** Розробити методику та представити результати розрахунку окупності варіанту будівництва житлового комплексу, найбільш ефективного за критеріями тривалості і бюджету, в умовах організаційних обмежень. **Основні результати.** Аналіз інформаційних джерел показав, що умови житлового будівництва надзвичайно мінливі, тому важливо дослідити вплив зміни організаційних рішень на основні показники, насамперед на бюджет та тривалість будівництва. Розроблено методику оптимізації організаційних рішень будівництва житлового комплексу із використанням сучасних програмних продуктів з галузі управління проектами. Шляхом організаційного моделювання у програмі MS Project та економіко-математичного моделювання у пакеті MS Excel побудовані достовірні моделі процесу будівництва. Згідно плану експерименту зафіксовані значення показників та була вибрана поліноміальна модель другого ступеню, що відповідає плану експериментів. На цій основі побудовані експериментально-статистичні моделі зміни показників від факторів, що варіюються. Графічним способом визначені найбільш ефективні моделі будівництва в обмежених умовах їх реалізації. **Висновок.** Запропонована методика може використовуватися для інших проектів будівництва житлового комплексу, а побудовані експериментально-статистичні залежності дозволили ввести обмеження і визначити найбільш ефективний варіант організації будівництва.

**Ключові слова:** організація будівництва, цивільне будівництво, житловий комплекс, тривалість, бюджет

## CALCULATION OF RESIDENTIAL COMPLEX PAYBACK UNDER THE ORGANIZATIONAL RESTRICTIONS

HONCHARENKO D.F.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
MENEILIUK I.O.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1\*</sup> Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, 40, Sumska St., 61002, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [gonch@kstuca.kharkov.ua](mailto:gonch@kstuca.kharkov.ua)

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, 40, Sumska St., 61002, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [meneviv@gmail.com](mailto:meneviv@gmail.com)

**Abstract. Problem statement.** The volume of civil construction in Ukraine is constantly growing, while the conditions for this construction are more complex than other types of construction. There have not found exhaustive system recommendations on the choice of organizational and financial decisions on this topic in studied normative and reference literature. The high social, economic and technical effect of solving the problem of choosing rational organizational decisions in civil engineering determines the high relevance of the research topic. **Purpose.** To develop a methodology and to present the results of the calculation of the payback period of a residential complex for variant that is the most efficient according to the criteria of duration and budget under the conditions of organizational constraints. **Main results.** Analysis of information sources has shown that housing construction conditions are extremely variable, so it is important to study the impact of changes in organizational decisions on key indicators, primarily on the budget and duration of construction. The method of optimization of organizational decisions of housing construction using modern software products from the field of project management was developed. Through the organizational modeling in the MS Project program and economical mathematical modeling in the MS Excel package, reliable models of the construction process were built. According to the experiment plan, the values of the indicators were fixed and the polynomial model was selected according to the experiment plan. On this basis, experimental-statistical models of indicators variation from variables were constructed. The most efficient models of construction were determined graphically in the limited conditions of their implementation. **Conclusion.** The proposed technique can be used for other residential complex project designs, and the built experimental and statistical dependencies have allowed the determination of the most efficient option for the construction organization under the working restrictions.

**Keywords:** *construction organization, civil engineering, residential complex, duration, budget*

**Постановка проблеми.** Объем возведения гражданских зданий в Украине за 2010–2018 гг. вырос в 3,4 раза (с 19 659,1 млн грн до 66 791,6 млн грн). При этом условия возведения гражданских зданий являются более сложными по сравнению с другими видами строительства по двум основным причинам: усложненные инженерные условия, а также нестабильность финансовой ситуации на макро- и микроэкономическом уровнях. В изученной нормативной и справочной литературе не найдено исчерпывающих системных рекомендаций по выбору организационных и финансовых решений по указанной теме. Тема исследования является чрезвычайно актуальной, учитывая высокий социальный, экономический и технический эффект решения проблемы выбора рациональных организационных решений при гражданском строительстве.

**Анализ публикаций.** В соответствии с исследованиями, среди факторов, которые имеют наибольшее влияние на процесс

возведения жилых комплексов, наиболее значимыми являются формы и способы финансирования [11], конструктивно-технологические особенности [1], инженерные условия строительства [2]. Исследователи выделяют следующие основные показатели жилищного строительства: продолжительность, стоимость, трудоёмкость [5; 9]. Учитывая, что жилищное строительство проводится в нестабильных финансово-экономических условиях [4; 12], важно исследовать влияние организационных режимов строительства на эти показатели, а также на интенсивность финансирования.

Анализ работ, посвящённых оптимизации организационно-технологических решений строительства и реконструкции [6; 7; 14] позволяет заключить, что применение экспериментально-статистического моделирования является эффективным способом решения подобных задач и может быть использовано при моделировании и оптимизации

операционной деятельности предприятий по строительству и реконструкции элеваторов.

Методикам оптимизации при применении экспериментально-статистического моделирования посвящены работы [3; 8; 13]. Для создания модели операционной деятельности строительно-монтажной организации целесообразно [6; 7; 14] использовать специализированные программы для управления проектами.

**Цель и задачи статьи** - разработать методику и представить результаты расчёта окупаемости варианта строительства жилого комплекса, наиболее эффективного по критериям продолжительности и бюджета, в условиях организационных ограничений. Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Разработка методики расчёта окупаемости строительного проекта, включающей вариантное численное моделирование.

2. Экспериментально-статистическое моделирование строительства жилого комплекса и введение организационных ограничений в закономерности изменения продолжительности и бюджета проекта.

3. Расчёт сроков окупаемости для наиболее эффективного варианта в условиях заданных ограничений.

**Изложение материала.** Для оценки эффективности организационных решений при строительстве жилого комплекса предложено использовать теорию экспериментально-статистического моделирования. Суть такого моделирования заключается в наблюдении за исследуемой системой путём фиксации значений исходящих параметров при задании значений входных. При этом в настоящем исследовании система представлена в виде графика производства работ. Алгоритм экспериментально-статистического моделирования показан на рисунке 1.

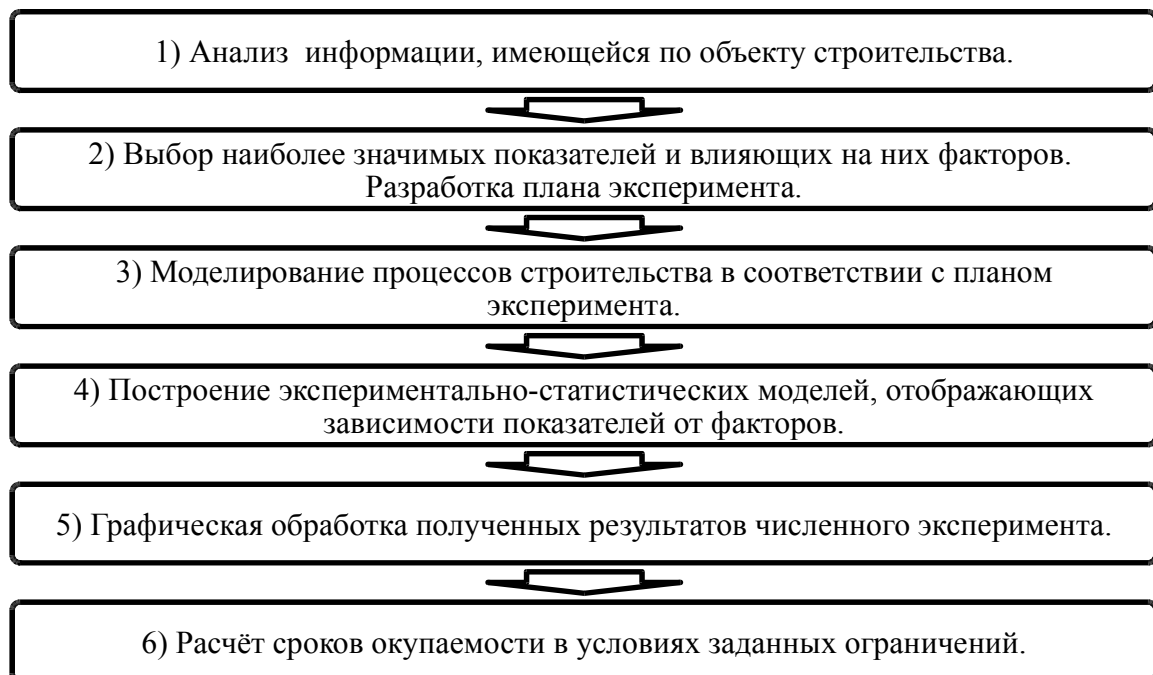


Рис. 1. Алгоритм исследования / Fig. 1. Research algorithm

Основными являются следующие показатели:

- $Y_1$  – бюджет строительства – прямые затраты (стоимость труда рабочих, затраты на эксплуатацию механизмов,

оборудования и строительной техники, стоимость материалов и конструкций) и общепроизводственные (расходы непроизводственного назначения,



условно не изменяются в течение всего хода работ).

- $Y_2$  – продолжительность строительства – время от начала первой работы до окончания последней.
- На выбранные показатели наибольшее влияние оказывают следующие факторы:
- $X_1$  – интенсивность использования рабочего времени – при разработке плана эксперимента было выбрано 40, 72, 112 рабочих часов в неделю;
- $X_2$  – совмещенность процессов – отношение суммарной длины периодов смещения между парами предыдущих и последующих работ к суммарной продолжительности всех процессов на всех захватках, где (формула 1):

–  $\sum t_{совм.}$  - суммарный резерв времени, высвободившийся в результате совмещения работ во времени;

$$K = \frac{\sum t_{совм.}}{\sum t_{прод.}} * 100 = \frac{\sum t_{прод.} - t_{оконч.}}{\sum t_{прод.}} * 100 \quad (1)$$

$$x_i = \frac{X_i - \frac{X_{imax} + X_{imin}}{2}}{\frac{X_{imax} - X_{imin}}{2}} \quad (2)$$

$$Y_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (3)$$

$$Y_1 = 426,33 - 160 X_1 - 28,33 X_2 + 53,67 X_1^2 + 10 X_1 X_2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 483,44 - 9,86 X_1 - 1,83 X_2 + 4,7 X_1^2 + 0,99 X_1 X_2 \quad (5)$$

Для решения задач настоящего исследования выбрана полиномиальная экспериментально-статистическая модель, общий вид которой представлен в формуле 3. Результаты численного эксперимента показаны в таблице 1.

- $\sum t_{прод.}$  - суммарная продолжительность всех процессов на всех захватках;
- $t_{оконч.}$  - длительность комплекса строительных работ, полученная в результате смещения работ между собой.
- Переход к кодированным уровням факторов выполнен по типовой формуле 2, где
- $x_i$  – заданный уровень фактора в нормализованном виде;
- $X_i$  – заданный уровень фактора в натуральном виде;
- $X_{imax}$  – максимальный уровень фактора в натуральном виде;
- $X_{imin}$  – минимальный уровень фактора в натуральном виде.

Исследуемые показатели зависят от обоих рассмотренных факторов: интенсивности использования рабочего времени и совмещенности работ. Экспериментально-статистические модели продолжительности (формула 4) и бюджета (формула 5) представлены ниже.

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования / The results of an experimental study

Натуральные значения факторов			Показатели		
№	$X_1$ – Интенсивность использования рабочего времени (час/нед.)	$X_2$ – Коэффициент совмещения работ	$Y_1$ – Бюджет, грн,	$Y_2$ – Продолжительность, дни	$Y_3$ – Интенсивность финансирования, грн/мес.
1	2	3	4	5	6
1	40	15%	500 692 449	680	21 127 503
2	72	15%	485 764 700	453	31 525 938
3	40	20%	497 706 899	639	22 461 608
4	40	25%	495 716 532	599	24 290 989

Окончание таблицы 1					
1	2	3	4	5	6
5	72	20%	483 774 333	426	33 499 622
6	72	25%	480 776 400	399	35 740 422
7	112	15%	478 810 800	340	41 887 733
8	112	20%	478 319 400	320	44 454 877
9	112	25%	477 828 000	299	47 549 010

В ходе графической обработки результатов были построены диаграммы изменения показателей бюджета ( $Y_1$ ) и продолжительности ( $Y_2$ ) строительства. На этих диаграммах также показаны типовые ограничения по уровням исследуемых факторов:

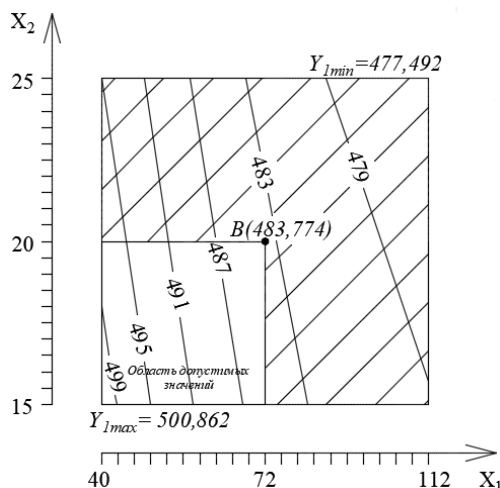
- совмещенность процессов – 20 %;
- интенсивность использования рабочего времени – 72 часа в неделю.

Для анализа действия ограничений на диаграмме изоповерхности показана область допустимых значений времени строительства. Значения в заштрихованной области не могут быть приняты из-за ограничений (рис. 2). При рассматриваемых сочетаниях ограничений выявлено эффективное значение показателя «бюджет строительства» (рис. 2 а), равное  $A = 483,774$  млн грн. Данная модель возможна при  $X_1 = 72$  рабочих часа в неделю,  $X_2 = 15\%$ . Выявлена закономерность уменьшения бюджета строительства при увеличении уровней факторов

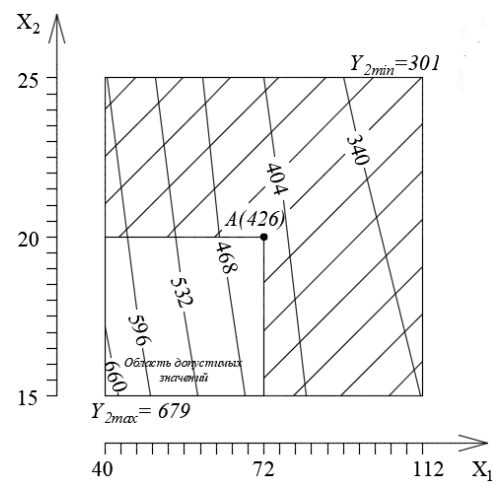
использования рабочего времени ( $X_1$ ) и совмещенности процессов ( $X_3$ ). Эффективное значение показателя «продолжительность строительства» (рис. 2 б), равное  $A = 426$  дней. Данная модель возможна при:  $X_1 = 72$  рабочих часов в неделю,  $X_2 = 20\%$ . Выявлена закономерность уменьшения количества рабочих дней при увеличении уровней факторов использования рабочего времени ( $X_1$ ) и совмещенности процессов ( $X_2$ ).

В настоящем исследовании срок завершения строительства не влияет на окупаемость т. к. окупаемость зависит от продаж. В свою очередь, продажи квартир и апартаментов начинаются на этапе земляных работ.

Средняя стоимость покупки квартиры или апартаментов в данном жилом комплексе равна 39 000 грн/м<sup>2</sup>. Период окупаемости проекта – период, за который сумма чистой прибыли и эксплуатационных расходов достигает значения дисконтированных начальных вложений.



а



б (b)

Рис. 2. Изменение показателей «бюджет строительства» (а) и «время строительства» (б) при ограничениях: совмещенность процессов ( $X_2$ ) не более 20 %, интенсивность использования рабочего времени ( $X_1$ ) не более 72 часа в неделю / Fig. 2. Changes in the indicators “construction budget” (а) and “construction time” (b) with restrictions: the combination of processes ( $X_2$ ) is not more than 20%, the intensity of the use of working time ( $X_1$ ) is not more 72 hours a week

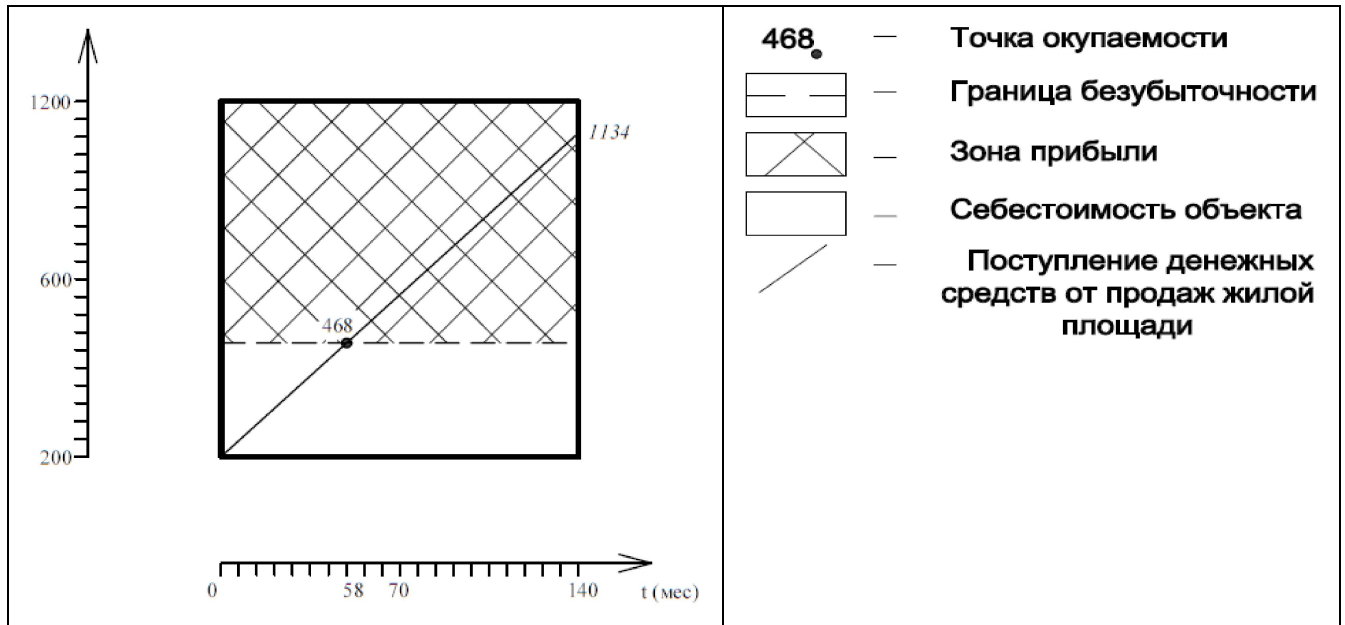


Рис. 3. Графік окупаемости проекта / Fig. 3. Project Payback Schedule

Таблица 2

**Количество апартаментов в жилом комплексе / Number of apartments in the residential complex**

Количество комнат в апартаменте х	Площадь апартаментов в (м <sup>2</sup> )	Количество апартаментов в жилом комплексе квартир (шт.)	Общая площадь апартаментов (м <sup>2</sup> )	Количество проданных апартаментов в жилом комплексе квартир (шт.)	Общая площадь апартаментов (м <sup>2</sup> )
1	73	77	5 621	16	1 169
1	53	201	10 653	59	3 129
2	79	16	1 264	8	632
2	106	16	1 696	10	1 060
3	109	65	7 085	11	1 199
3	130	15	1 950	9	1 170
4	207	2	414	2	414
4	197	2	394	2	394
Всего		394	29 077	117	9 164

В таблице 2 представлено общее количество квартир и апартаментов в жилом комплексе и количество апартаментов, проданных за 44 месяца в жилом комплексе. Из данных таблицы следует, что за 44 месяца было продано 9 164 м<sup>2</sup> из возведенных 29 077 м<sup>2</sup>. Путем составления пропорции мы получаем, что все квартиры будут проданы за 140 месяцев. Стоимость строительства составляет 484 млн грн. Доход от продажи 9 164 м<sup>2</sup> составляет 357,396 млн грн.

Графическим способом находим предполагаемый период окупаемости 58 месяцев (рис. 3), принимая предположение, что покупательная способность за этот период времени не

упадет. Из рисунка 3 видно, что период окупаемости жилого комплекса составит 58 месяцев. Прибыль от продажи квартир и апартаментов превышает затраты на строительство в 2,42 раза и составляет 1 134 млн грн.

**Выводы**

1. Предложенная в статье методика позволяет рассчитать окупаемость инвестиционно-строительного проекта и может использоваться для других проектов строительства жилого комплекса.
2. Построенные экспериментально-статистические зависимости времени и бюджета строительства позволили ввести ограничения и определить

наиболее эффективный вариант графическим способом и составил  
организации строительства. 58 месяцев.

3. Период окупаемости для выбранной модели строительства был определён

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Большаков В. И. Формування проектних та організаційно-технологічних рішень зведення висотних багатофункціональних комплексів / В. И. Большаков, С. И. Заяць // Вісник ПДАБА. – 2016. – № 5. – С. 71–78.
2. Григоровський П. Є. Вплив умов ущільненої забудови на вартість та трудомісткість спорудження житлових будинків / П. Є. Григоровський, М. І. Надточій // Нові технології в будівництві. – 2010. – С. 82–84.
3. Задгенидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем : монография / И. Г. Задгенидзе. – Москва : Наука, 1976. – 390 с.
4. Ковтун М. В. Становлення та розвиток ринку житла України в умовах ринкових перетворень / М. В. Ковтун // Науковий вісник Ужгородського університету. – 2014. – № 1. – С. 282–286.
5. Кравчуновська Т. С. Розвиток будівництва доступного житла з урахуванням концепції стійкого розвитку міст / Т. С. Кравчуновська, С. П. Броневицький. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2015. – № 82. – С. 104–110.
6. Лобакова Л. В. Організаційне моделювання реконструкції будівель при їх перепрофілюванні : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.08. «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / Л. В. Лобакова. – Одеса, 2016. – 21 с.
7. Оптимизация организационно-технологических решений реконструкции высотных инженерных сооружений: монография / [А. И. Менейлюк, М. Н. Ершов, А. Л. Никифоров, И. А. Менейлюк]. – Київ : ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. – 332 с.
8. Логические основания планирования эксперимента : монография / [В. В. Налимов, Т. И. Голикова]. – Москва: Металлургия, 1980. – 152 с.
9. Нечепуренко Д. С. Систематизація організаційно-технологічних факторів, які впливають на тривалість та вартість реалізації енергозберігаючих проектів комплексної реконструкції житлової забудови / Д. С. Нечепуренко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2014. – № 120. – С. 120–126.
10. Официальный сайт Green Wood [электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://green-wood.com.ua/>
11. Покотілов А. А. Фактори і параметри інвестиційної привабливості об'єктів житлового будівництва / А. А. Покотілов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – № 37. – С. 285–289.
12. Сафонов Ю. М. Про механізми залучення та джерела фінансування інвестицій у будівництво житла в Україні / Ю. М. Сафонов, В. Г. Євтєєва // Інвестиції : практика та досвід. – 2013. – № 16. – С. 18–21.
13. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов / Д. Финни, под ред. Линника Ю. В. – Москва : Наука, 1970. – 281 с.
14. Чернов І. С. Вибір ефективних моделей зведення житлових будівель при фінансовій ситуації, що змінюється: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.08. «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / І. С. Чернов. – Одеса, 2013. – 20 с.

### REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Zaiats Ye.I. *Formuvannya proektnykh ta orhanizatsiyno-tekhnolohichnykh rishen' zvedennya vysotnykh bahatofunktsional'nykh kompleksiv* [Formation of design and organizational and technological solutions for the construction of high-rise multifunctional complexes]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of PSACEaA]. 2016, no. 5, pp. 71–78. (in Ukrainian).
2. Grigorovskij P.E. and Nadtochij M.I. *Vplyv umov ushchil'nenoyi zabudovy na vartist' ta trudomistkist' sporudzhennya zhytlovykh budynkiv* [Influence of compact construction on the cost and complexity of the dwelling houses construction]. *Novi tekhnolohiyi v budivnytstvi* [New Technologies in Construction]. 2010, pp. 82–84. (in Ukrainian)
3. Zadgenidze I.G. *Planirovaniye eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem* [Planning the experiment for the study of polycomponent systems]. Moscow : Nauka Publ., 1976, 390 p. (in Russian).
4. Kovtun M.V. *Stanovlennya ta rozvytok rynku zhytla ukrayiny v umovakh rynkovykh peretvoren'* [Formation and development of Ukrainian housing market in conditions of market transformations]. *Naukovyy visnyk Uzhhorods'koho universytetu* [Scientific herald of Uzhgorod University]. 2014, no. 1, pp. 282–286. (in Ukrainian).
5. Kravchunovska T.S. and Bronevic'kij S.P. *Rozvytok budivnytstva dostupnogo zhytla z urakhuvannyam kontseptsiyi stiykoho rozvytku mist* [Development of affordable housing construction concidering the concept of sustainable urban development]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2015, no. 82, pp. 104–110. (in Ukrainian).

6. Lobakova L.V. *Orhanizatsiyne modelyuvannya rekonstruktsiyi budivel' pry yikh pereprofilyuvanni : avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk : spets. 05.23.08. "Tekhnolohiya ta orhanizatsiya promyslovoho ta tsyvil'noho budivnytstva"* [Organizational modeling of buildings reconstruction during their redevelopment : avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk : spec. 05.23.08 – Tehnologiya ta organizatsiya promislavogo ta tsivilnogo budivnitstva]. Odesa, 2016, 21 p. (in Ukrainian).
7. Menevlyuk O.I., Yershov M.N., Nikiforov A.L. and Menevlyuk I.O. *Optimizatsiya organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy rekonstruktsii vysotnykh inzhenernykh sooruzheniy* [Optimization of organizational and technological solutions of high-rise engineering structures reconstruction]. Kyiv : Interservis, 2016, 332 p. (in Russian).
8. Nalimov V.V. and Golikova T.I. *Logicheskiye osnovaniya planirovaniya eksperimenta* [The logical base for the design of experiment]. Moscow : Metallurgiya, 1980, 152 p. (in Russian).
9. Nechepurenko D.S. *Systematyzatsiya orhanizatsiyno-tekhnolohichnykh faktoriv, yaki vplyvayut' na tryvalist' ta vartist' realizatsiyi enerhozberihayuchykh proektiv kompleksnoyi rekonstruktsiyi zhytlovyi zabudovy* [Systematization of organizational and technological factors that affect the duration and cost of implementing energy-saving projects for the comprehensive reconstruction of residential development]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2014, no. 120, pp. 120–126. (in Ukrainian).
10. Official website Green Wood [Electronic resource].
11. Pokotilov A.A. *Faktory i parametry investytsiynoyi pryvablyvosti ob'yektiv zhytlovoho budivnytstva* [Factors and parameters of investment attractiveness of housing construction]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named V. Lazaryan]. 2011, no. 37, pp. 285–289. (in Ukrainian).
12. Safonov Ju.M., Safonov Ju.M. and Yevteeva V.G. *Pro mekhanizmy zaluchennya ta dzherela finansuvannya investytsiy u budivnytstvo zhytla v Ukrayini* [On the mechanisms of attraction and sources of financing for investments in housing construction in Ukraine]. *Investytsiyi : praktyka ta dosvid* [Investments : practice and experience]. 2013, no. 16, pp. 18–21. (in Ukrainian).
13. Finni D. *Vvedeniye v teoriyu planirovaniya eksperimentov* [Introduction to design of experiments]. Translation of Romanovskaiya I.L. and Husu A.P., edited by Yu.V. Linnik. Moscow : Nauka Publ., 1970, 281 p. (in Russian).
14. Chernov I.S. *Vybir efektyvnykh modeley zvedennya zhytlovykh budivel' pry finansovoyi sytuatsiyi, shcho zminyuyet'sya : avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk : spets. 05.23.08. "Tekhnolohiya ta orhanizatsiya promyslovoho ta tsyvil'noho budivnytstva"* [Choice of effective models of residential buildings construction at the changing financial situation : the dissertation author's abstract for the degree of a Cand. Tech. Sc.: specialty – 05.23.08. "Technology and Organization of Industrial and Civil Engineering"]. Odesa, 2013, 20 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 25.02.2019 р.

УДК 65

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.102.412

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕХНІЧНИХ ВПЛИВІВ НА АВТОМОБІЛЬ

САКНО О. П.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
КОЛЕСНИКОВА Т. М.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ОЛЛО В. П.<sup>3</sup>, канд. пед. наук

<sup>1\*</sup> Кафедра експлуатації та ремонту машин, ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (050) 295-51-16, e-mail: [sakno-olga@ukr.net](mailto:sakno-olga@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4672-6651

<sup>2</sup> Кафедра експлуатації та ремонту машин, ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (095) 225-52-53, e-mail: [tnk1403@ukr.net](mailto:tnk1403@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8568-4688

<sup>3</sup> Кафедра продовольчого та речового забезпечення, Військова академія, вул. Фонтанська дорога, 10, Одеса, Україна, 65009, тел. +38 (099) 053-71-93, e-mail: [ollopv@gmail.com](mailto:ollopv@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1799-2299

**Анотація. Постановка проблеми.** Як свідчить досвід передових країн світу, тенденції розвитку конструкції автомобілів за останні роки значно змінилися, отже виникає необхідність розробки пропозицій щодо їх ефективної технічної експлуатації. Робота зі створення особливостей системного моделювання щодо створення технологій технічного обслуговування (ТО) автомобілів потребує нові підходи. Один з головних принципів організації ТО автомобілів за кордоном та в Україні полягає в тому, що відповідальність за організацію ТО і ремонту протягом всього періоду експлуатації автомобілів несе, як правило, автомобілебудівна фірма-виробник. **Мета.** Системне моделювання для створення технологій ТО автомобілів. Актуальність досліджень пов'язана з необхідністю узагальнити сучасні технології для ТО автомобілів. **Висновок.** Завдяки синтезу сучасних технологій ТО автомобілів можна послідовно проводити технічні впливи для підтримки надійності АТЗ, створювати системи ТО (обсяг робіт) заданого рівня складності. Основна особливість синтезу технології є реалізація на основі рекурентної послідовності. Розроблена структурна модель континуума автомобіля, яка дозволяє вивчити вплив його кількісних та якісних параметрів. Розроблена модель системи технологічних перетворень (модель технології ТО) може розглядати питання аналізу, синтезу, реалізації, функціонування, еволюції, модифікації, удосконалення ТО та утилізації автомобілів. В процесі моделювання систем аналіз та синтез реалізується на базі рекурентних зв'язків.

**Ключові слова:** технічні впливи; технологія; технічне обслуговування; автомобіль; технологічний процес

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА АВТОМОБИЛЬ

САКНО О. П.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
КОЛЕСНИКОВА Т. Н.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ОЛЛО В. П.<sup>3</sup>, канд. пед. наук

<sup>1\*</sup> Кафедра эксплуатации и ремонта машин, ДВНЗ «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Дніпро, Украина, 49600, тел. +38 (050) 295-51-16, e-mail: [sakno-olga@ukr.net](mailto:sakno-olga@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4672-6651

<sup>2</sup> Кафедра эксплуатации и ремонта машин, ДВНЗ «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Дніпро, Украина, 49600, тел. +38 (095) 225-52-53, e-mail: [tnk1403@ukr.net](mailto:tnk1403@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8568-4688

<sup>3</sup> Кафедра продовольственного и вещевого обеспечения, Военная академия, ул. Фонтанская дорога, 10, Одеса, Украина, 65009, тел. +38 (099) 053-71-93, e-mail: [ollopv@gmail.com](mailto:ollopv@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1799-2299

**Аннотация. Постановка проблемы.** Как показывает опыт передовых стран мира, тенденции развития конструкции автомобилей за последние годы значительно изменились, следовательно, возникает необходимость разработки предложений по их эффективной технической эксплуатации. Работа по созданию особенностей системного моделирования по созданию технологий технического обслуживания (ТО) автомобилей требует новые подходы. Один из главных принципов организации ТО автомобилей за рубежом и в Украине заключается в том, что ответственность за организацию ТО и ремонта в течение всего периода эксплуатации автомобилей несет, как правило, автомобилестроительная фирма-производитель. **Цель.** Системное моделирование для создания технологий ТО автомобилей. Актуальность исследований связана с необходимостью обобщить современные технологии для ТО автомобилей. **Вывод.** Благодаря синтезу современных технологий ТО

автомобилей можно последовательно проводить технические воздействия для поддержания надежности АТС, создавать системы ТО (объем работ) заданного уровня сложности. Основная особенность синтеза технологии является реализация на основе рекуррентной последовательности. Разработана структурная модель континуума автомобиля, которая позволяет изучить влияние его количественных и качественных параметров. Разработана модель системы технологических преобразований (модель технологии ТО) может рассматривать вопросы анализа, синтеза, реализации, функционирования, эволюции, модификации, усовершенствования ТО и утилизации автомобилей. В процессе моделирования систем анализ и синтез реализуется на базе рекуррентных связей.

**Ключевые слова:** *технические воздействия; технология; техническое обслуживание; автомобиль; технологический процесс*

## SIMULATION OF THE SYSTEM OF THE TECHNOLOGY OF TECHNICAL INFLUENCES ON VEHICLE

SAKNO O.P.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Ass. Prof.*,  
KOLESNIKOVA T.M.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Ass. Prof.*,  
OLLO V.P.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Pedag.)*

<sup>1\*</sup> Department of Operation and Maintenance of Machines, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (050) 295-51-16, e-mail: [sakno-olga@ukr.net](mailto:sakno-olga@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4672-6651

<sup>2</sup> Department of Operation and Maintenance of Machines, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (095) 225-52-53, e-mail: [tnk1403@ukr.net](mailto:tnk1403@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8568-4688

<sup>3</sup> Department of Food and Supplies, Military Academy (Odesa), 10, Fontanska Doroha St., Odesa, Ukraine, 65009, tel. +38 (099) 053-71-93, e-mail: [ollopv@gmail.com](mailto:ollopv@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1799-2299

**Abstract. Problem statement.** As the experience of the advanced countries of the world shows, the trends in the structure of vehicles have changed significantly in recent years, therefore, it is necessary to develop proposals for their efficient technical operation. The work on the creation of features of system simulation to create technologies for vehicle maintenance requires new approaches. One of the main principles of the organization of the maintenance of vehicles abroad and in Ukraine lies in the fact that the responsibility for the organization of maintenance and repair during the entire period of operation of vehicles is, as a rule, the automobile manufacturer. **Purpose.** System simulation to create technology for vehicle maintenance. The relevance of the research is connected with the need to summarize modern technologies for the maintenance of vehicles. **Conclusion.** In virtue of the synthesis of modern technologies for vehicle maintenance, it is possible to consistently carry out technical influences to maintain the reliability of the vehicle, create maintenance systems (volume of service) of a given level of complexity. The main feature of the synthesis technology is the implementation based on the recurrent sequence. The structural model of a vehicle continuum has been developed, it allows to study the influence of its quantitative and qualitative parameters. The model of the system of technological transformations (model of maintenance) can consider the questions of analysis, synthesis, implementation, operation, evolution, modification, improvement of maintenance and utilization of vehicles. Analysis and synthesis are implemented on the basis of recurrent relationships in the process of simulation of systems.

**Keywords:** *technical influence; technology; maintenance; vehicle; technological process*

**Постановка проблеми.** Як свідчить досвід передових країн світу, тенденції розвитку автомобілів за останні роки значно змінилися, отже виникає необхідність розробки пропозицій щодо їх ефективної технічної експлуатації. Робота зі створення особливостей системного моделювання щодо створення технологій технічного обслуговування (ТО) автомобілів потребує нові підходи.

**Аналіз публікацій.** Сталість є пріоритетом розвитку міст країн. Отже, наприклад, скорочення викидів енергії та

вуглекислого газу стає все більш значним у автотранспортних засобах (АТЗ). Проте АТЗ є складними системами і залежать від соціальних, економічних та екологічних факторів [1].

Швидке зростання попиту на АТЗ призведе до надмірних викидів двоокису вуглецю та енергетичної кризи [2]. Відповідно до ключової світової енергетичної статистики, сукупний енергетичний попит на глобальну транспортну систему збільшився з 23 % (1973 р.) до 28 % (2012 р.).

Аналіз останніх досягнень і публікацій свідчить про зростання уваги до питань створення нових технологій для ТО автомобілів [3–5]. Отже, для створення технологій для обслуговування АТЗ необхідно створювати їх системне моделювання.

**Мета статті.** Системне моделювання для створення технологій технічного обслуговування АТЗ. Актуальність досліджень пов'язана з необхідністю узагальнити сучасні технології для ТО автомобілів.

**Виклад матеріалу.** Один з головних принципів організації ТО автомобілів за кордоном та в Україні полягає в тому, що відповідальність за організацію ТО і ремонту протягом всього періоду експлуатації автомобілів несе, як правило, автомобілебудівна фірма-виробник.

На рисунку 1 надана схема синтезу технологій, в якій основна особливість синтезу технології є реалізація на основі рекурентної послідовності за сьома стадіями синтезу. При цьому на основі того, що технологія може структуруватися на базі двох систем (типи «технологічний процес» та «технічна система»), дана схема реалізується по двох основних напрямках. Між стадіями та напрямками даної схеми реалізуються зв'язки на основі рекурентної послідовності виконання технічного сервісу АТЗ. Це дозволяє послідовно, з урахуванням попередньої стадії, а також можливості повернення та уточнення результатів підтримки надійності АТЗ створювати системи заданого рівня складності.

Для вивчення впливу кількісних та якісних параметрів АТЗ (компонентів, агрегатів тощо) всілякого ієрархічного рівня на створювану технологію розроблена структурна модель континуума (лат. *continuum* – неперервний, суцільний) об'єктів АТЗ (рис. 2), яка має потужність  $(n+1)$  об'єктів. На кожному рівні ієрархії структура конструкції АТЗ містить свої визначені кількісні та якісні характеристики.

В структурній моделі континуума об'єктів АТЗ кожний об'єкт  $a_i$  є оператором, коли він впливає на інші об'єкти, та

операндом, коли на нього діють інші об'єкти. В теорії технічних систем умовно прийнято, що коли об'єкт впливає на сусідній об'єкт, його називають оператором, а об'єкт, який отримав ці впливи – операндом.

Відношення між об'єктами  $F$  моделі (рис. 2) на кожному ієрархічному рівні моделюються за допомогою впливів, що реалізуються потоками матеріального, енергетичного та інформаційного типів:

$S_i^j(t_k)$  – матеріальний вплив  $i$ -го об'єкту на  $j$ -й об'єкт в момент часу  $t_k$ ;

$E_i^j(t_k)$  – енергетичний вплив  $i$ -го об'єкту на  $j$ -й об'єкт в момент часу  $t_k$ ;

$I_i^j(t_k)$  – інформаційний вплив  $i$ -го об'єкту на  $j$ -й об'єкт в момент часу  $t_k$ .

Підтримка стану даного об'єкту реалізується відношеннями  $F_i^j$  за рисунком 2 за допомогою петель, котрі можуть бути реалізовані потоками матеріального, енергетичного та інформаційного типів:

$$F_i^j = F_i^j(t_k) = S_i^j(t_k) \parallel E_i^j(t_k) \parallel I_i^j(t_k) \quad (1)$$

Структурна модель на рисунку 2 є відкритою до розвитку тому, що потужність (загальна кількість) об'єктів автомобіля  $N_R = (n+1)$  на кожному ієрархічному рівні  $R$  може змінюватися відповідно до збільшення об'єму задіяних ресурсів, систем (технологій). Кожна система (технологія) завжди прагне до збільшення розмірності різноманіття об'єктів (ієрархії по типу або класу АТЗ) та різноманіття об'єктів (ієрархії за складом АТЗ).

При збільшенні числа об'єктів системи (компонентів), кожний об'єкт АТЗ отримує допоміжні впливи або зв'язки від цих об'єктів, але і він повинен також сам діяти на них. Це забезпечує виникнення допоміжних ступенів свободи моделі на даному ієрархічному рівні. Для цього необхідно залучати допоміжні об'єми ресурсів.

При порушенні прямих зв'язків між об'єктами, що взаємодіють, процес їх розвитку сповільнюється із-за відсутності взаємодій. Однак взаємні впливи цих



об'єктів проявляються через інші об'єкти і зв'язки системи.

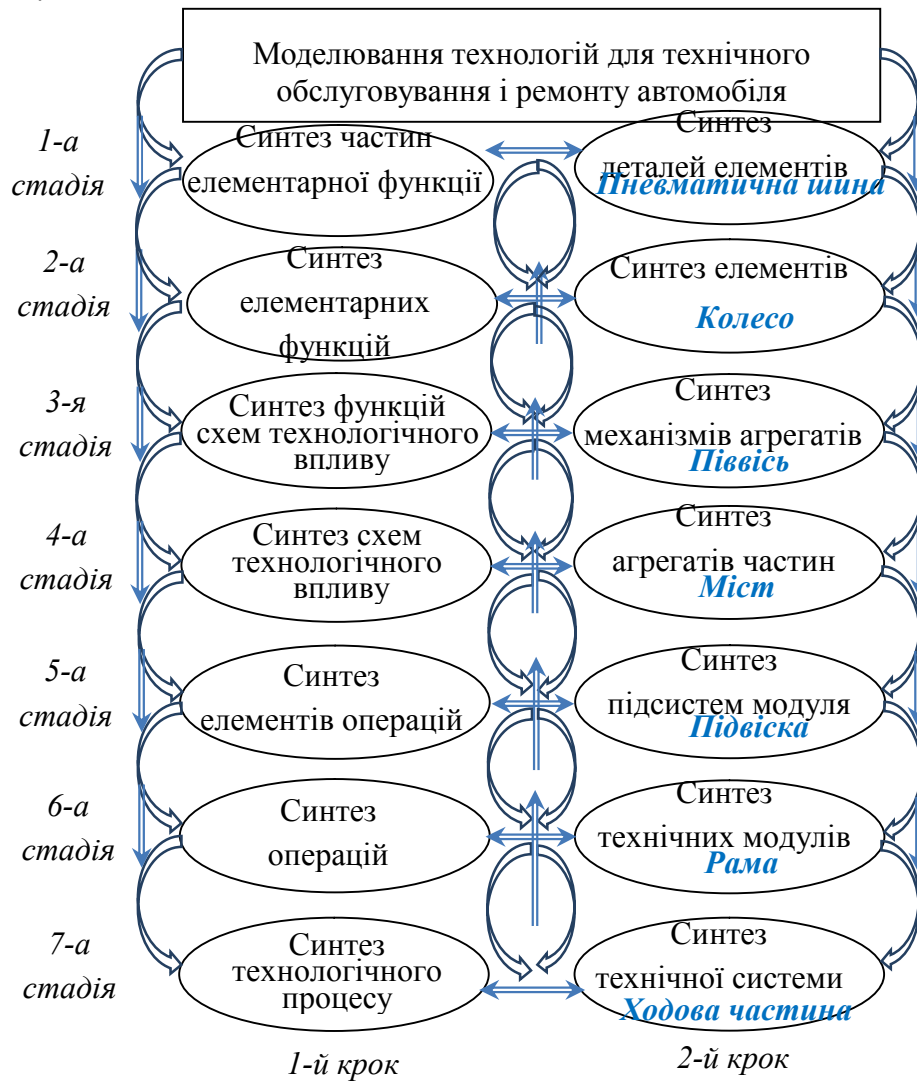


Рис. 1. Особливості синтезу елементів технології для ТО автомобілів / Fig. 1. Features of the synthesis of elements of technology for vehicle maintenance

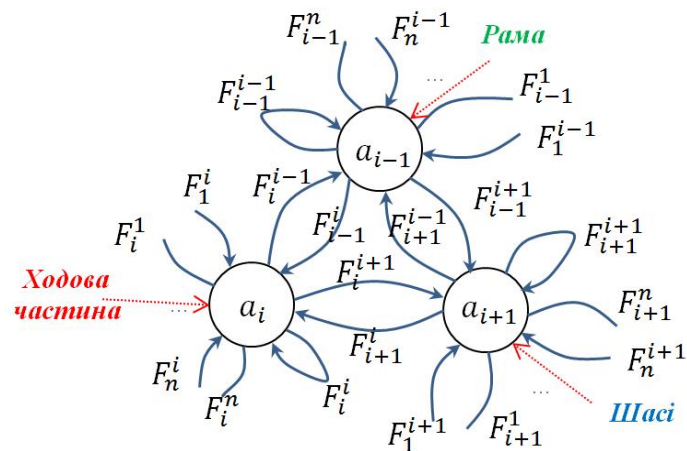


Рис. 2. Структурна модель континуума автомобіля / Fig. 2. Structural model of the continuum of vehicle

Коли усі зв'язки з якимись об'єктом рвуться, то він знаходиться в ізоляції та розвиток реалізується через вплив  $F_i^j$ , який забезпечує підтримку технічного стану АТЗ. При зменшенні числа об'єктів і зв'язків системи її поведінка має регресивний розвиток аж до утилізації АТЗ. Але це може викликати створення і розвиток нової системи (нового АТЗ) найбільш з високим якісним рівнем структури і параметрів.

Модель системи технологічних перетворень (модель технології ТО) надана на рисунку 3. Це базова модель технології ТО і є  $a_i$  елементом (АТЗ) моделі рисунку 2. За допомогою цієї моделі (рис. 3) можна

розглядати питання аналізу, синтезу, реалізації, функціонування, еволюції, модифікації, удосконалення ТО та утилізації АТЗ. Вона дає можливість комплексно рішення завдання створення прогресивних технологій нового покоління. Використання наданих моделей дозволяє рішення завдання систематики технологій в техніці, їх еволюції та модифікації. Ці моделі забезпечують можливість досліджувати процеси, виявляти взаємозв'язки і визначати характеристики технології, що досліджується, на різних рівнях абстрагування АТЗ.

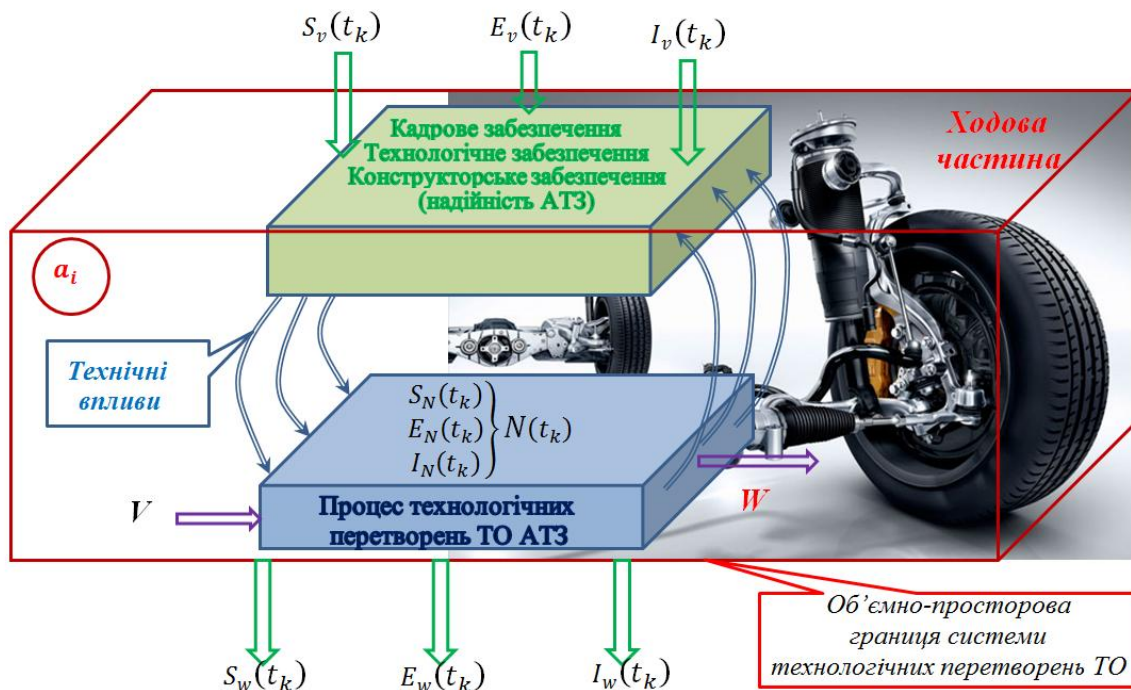


Рис. 3. Модель системи технологічних перетворень (базова модель технології ТО) / Fig. 3. System model of technological transformations (base model of technology of vehicle maintenance):  $S_N(t_k)$  – матеріальний вплив на технічний стан об'єкту (АТЗ) / material impact on the technical condition of the object (ATZ);  $E_N(t_k)$  – енергетичний вплив / energy impact;  $I_N(t_k)$  – інформаційний вплив / information influence;  $V$  – вхідні параметри / input parameters;  $W$  – вихідні параметри / output parameters;  $N(t_k)$  – заданий технологічний вплив / given technological impact

Модель системи технологічних перетворень ТО (рис. 3) складається з об'єктів (АТЗ, компонент, підсистема тощо) визначеного ієрархічного рівня, що є одночасно операторами і операндами системи. Основні фактори, що впливають на модель – кадрове забезпечення (рівень кваліфікації персоналу), технологічне

забезпечення (засоби ТО та ремонту автомобілів), конструкторське забезпечення (надійність АТЗ). Вони здійснюють заданий технологічний вплив  $N(t_k)$  матеріального  $S_N(t_k)$ , енергетичного  $E_N(t_k)$  і інформаційного  $I_N(t_k)$  типів на підтримку роботоздатного стану АТЗ та реалізують процес технологічних перетворень АТЗ

(компонент, підсистема тощо) в стан, що має вхід  $V$  і вихід  $W$ . Модель реалізує функцію  $\varphi$  [4] технологічного перетворення ТО безліч входів операндів  $V = \{V_s\}$  в безліч виходів операндів  $W = \{W_t\}$ , яка описується як:

$$\varphi: \begin{matrix} \{V_s\} \\ \{W_t\} \end{matrix} \quad (2)$$

Система технологічних перетворень ТО має зворотний зв'язок з об'єктами системи. Зворотній зв'язок дозволяє отримати інформацію про кількісні й якісні параметри процесу технологічних перетворень ТО та ремонту АТЗ, дає можливість багаторазово використовувати засоби технологічних впливів.

Усі об'єкти системи АТЗ технологічних перетворень ТО функціонують в просторі й в часі (пробігу), тому між ними діють просторово-часові відносини. Обмежені об'єкти моделі просторово-часовою границею, яка визначає цю систему як функціональну одиницю або об'ємно-просторову виробничий елемент.

Вплив, що впливає на систему технологічних перетворень ТО та ремонту АТЗ з боку двох систем, можуть бути представлені як:

$$F^i = \{F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i\} = S_V(t_k) // E_V(t_k) // I_V(t_k) \quad (3)$$

де  $F^i$  – вектор узагальненого входу;  $S_V(t_k)$  – вхідні узагальнені впливи матеріального типу в момент часу  $t_k$  (пробігу АТЗ);  $E_V(t_k)$  – вхідні узагальнені впливи енергетичного типу в момент часу  $t_k$ ;  $I_V(t_k)$  – вхідні узагальнені впливи інформаційного типу в момент часу  $t_k$  (пробігу).

Вхідні впливи чинять різні дії на систему технологічного перетворення ТО. Основні завдання вхідних впливів  $F^i$  наступні: забезпечити необхідну структуру АТЗ, реалізація заданого рівня надійності компонентів АТЗ, відновлення компонентів (елементів, деталей тощо).

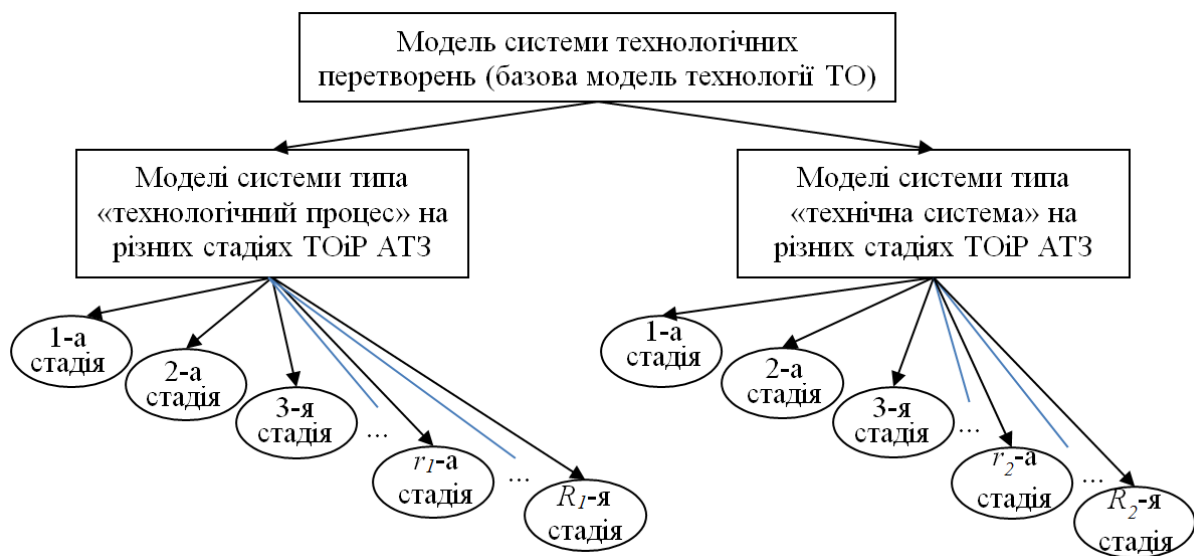


Рис. 4. Ієрархічні рівні моделей системи технологічних перетворень ТОіР АТЗ /  
 Fig. 4. Hierarchical levels of system models of technological transformations of vehicle maintenance

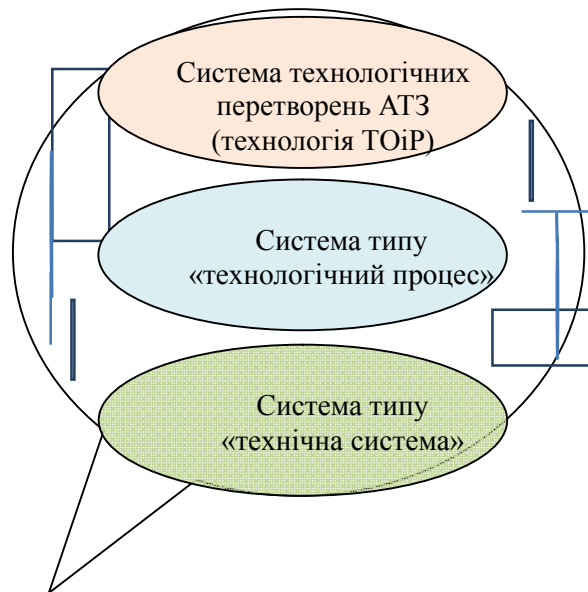


Рис. 5. Ієрархічні рівні систем та їх зв'язки в процесі синтезу /  
 Fig. 5. Hierarchical levels of systems and their links in the process of synthesis

Вплив, який реалізує система технологічних перетворень ТО на інші системи, має наступний вид:

$$F_i = \{ F_i^1, F_i^2, \dots, F_i^n \} = S_w(t_k) // E_w(t_k) // I_w(t_k) \quad (4)$$

де  $F_i$  – вектор узагальненого виходу системи;  $S_w(t_k)$  – вихідні узагальнені впливи матеріального типу в момент часу  $t_k$  (пробігу АТЗ);  $E_w(t_k)$  – вихідні узагальнені впливи енергетичного типу в момент часу  $t_k$ ;  $I_w(t_k)$  – вихідні узагальнені впливи інформаційного типу в момент часу  $t_k$ .

Вхідні й вихідні узагальнені впливи мають як основні потоки різних типів, що направлені на прогресивний розвиток системи, так і побічні (шкідливі, супутні), що негативно впливають на надійність розвитку АТЗ.

Модель системи технологічних перетворень (модель технології ТО), що надана на рис. 3, структурується на базі моделей системи типів «технологічний процес» і «технічна система» (рис. 4). При такому моделюванні система типу «технологічний процес» може реалізовуватися на різних етапах ТО і ремонту (ТОiP) АТЗ 1, 2, 3, ...,  $r_1$ , ...,  $R_1$ , система типу «технічна система» – 1, 2, 3, ...,  $r_2$ , ...,  $R_2$ .

Процес моделювання систем різних типів (рис. 5) має декілька ієрархічних рівнів. В процесі моделювання систем аналіз та синтез реалізується на базі рекурентних зв'язків. На верхньому ієрархічному рівні знаходиться «Система технологічних перетворень» (технологія ТОiP АТЗ), нижче – система типу «технологічний процес», а ще нижче – система типу «технічна система». Ці особливості необхідно враховувати в процесі проведення ТОiP АТЗ та вести їх аналіз і синтез в неперервному взаємозв'язку.

**Висновок.** Таким чином, завдяки синтезу сучасних технологій ТО автомобілів можна послідовно проводити технічні впливи для підтримки надійності АТЗ, створювати системи ТО (обсяг робіт) заданого рівня складності. Основна особливість синтезу технології є реалізація на основі рекурентної послідовності. Розроблена структурна модель континуума автомобіля, що дозволяє вивчити вплив його кількісних та якісних параметрів. Розроблена модель системи технологічних перетворень (модель технології ТО) може розглядати питання аналізу, синтезу, реалізації, функціонування, еволюції, модифікації, удосконалення ТО та утилізації АТЗ. В процесі моделювання систем аналіз та синтез реалізується на базі рекурентних зв'язків.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cheng Y.-H. Urban transportation energy and carbon dioxide emission reduction strategies / Y.-H. Cheng, Y.-H. Chang, I.J. Lu // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 157. – Pp. 953–973.
2. Brown J. Ultra-High Efficiency Electric Motor Generator / J. Brown // *Sustainable Automotive Technologies*. – 2012. – Pp. 187–191.
3. Wilberforce T. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars / T. Wilberforce, Z. El-Hassan, F.N. Khatib et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42 (40). – Pp. 25695-25734.
4. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения : монография / А. Н. Михайлов. – Москва : Машиностроение, 2009. – 346 с.
5. Ivanovich V. Software for Management of Maintenance System for Truck, Passenger Car, Coach and Work Machines / V. Ivanovich, R. Mitrovich, D. Jovanovich // *Sustainable Automotive Technologies*. – Springer, London, 2012. – Pp. 267–273.

### REFERENCES

1. Cheng Y.-H., Chang Y.-H. and Lu I.J. Urban transportation energy and carbon dioxide emission reduction strategies. *Applied Energy*. 2015, vol. 157. pp. 953–973.
2. Brown J. Ultra-High Efficiency Electric Motor Generator. *Sustainable Automotive Technologies*. 2012, pp. 187–191.
3. Wilberforce T., El-Hassan Z., Khatib F.N. et al. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, vol. 42 (40), pp. 25695-25734.
4. Mihaylov A. N. *Osnovyi sinteza funktsionalno-orientirovannykh tekhnologiy mashinostroeniya* [Basics of the synthesis of function-oriented engineering technologies]. Moscow : Mashinostroyeniye, 2009, 346 p. (in Russian).
5. Ivanovich V., Mitrovich R. and Jovanovich D. Software for Management of Maintenance System for Truck, Passenger Car, Coach and Work Machines. *Sustainable Automotive Technologies*. Springer, London, 2012, pp. 267–273.

Надійшла до редакції: 19.01.2019 р.

Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах,  
несуть автори.

Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Адреса редакції:

✉ Україна, 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а,  
кімната 558 (відповідальний секретар), кімната 203-а (редакційно-видавничий відділ),  
☎ +38(050) 452-43-63  
e-mail: [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Підписано до друку 27.03.2019 р. Формат 60×84 1/8.  
Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 6,81. Умовн. фарб.-відб. арк. 6,81.  
Обл.-видавн. арк. 13,63. Тираж 300 прим. Зам. 150

---

Ответственность за достоверность информации, представленной в печатных материалах,  
несут авторы.

Редколлегия не всегда разделяет авторскую точку зрения.

Адрес редакции:

✉ Украина, 49600, г. Днипро, ул. Чернышевского, 24-а,  
комната 558 (ответственный секретарь), комната 203-а (редакционно-издательский отдел).  
☎ +38(050) 452-43-63  
e-mail: : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Подписано к печати 27.03.2019 г. Формат 60×84 1/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,81. Усл. кр.-отт. л. 6,81.  
Уч.-изд. л. 13,63. Тираж 300 экз. Зак. 150

---

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.

Editorial address:

✉ room 558 (Executive Secretary), room 203a (Editorial Department  
24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine).  
☎ +38(050) 452-43-63  
e-mail: : [mitomdnipro1997@gmail.com](mailto:mitomdnipro1997@gmail.com)

Sent to press on 27 March 2019. Format 60×84 1/8.  
Offset printing. Conventional quire 6,81. Conventional colour imprints 6,81.  
Publisher's signatures 13,63. Number of copies 300. Order 150