



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 196

Харків 2021

УДК 656.2(062)

У збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

Google Scholar профіль: <https://scholar.google.com.ua>

Веб-сторінка збірника: <http://znp.kart.edu.ua>

Реферативна база

«Наукова періодика України»: <http://csw.kart.edu.ua>

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 7 від 23 червня 2021 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-
Universitet Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрійчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ,
м. Чернігів)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ХНТУСГ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.
(VGTU, Литва)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська
політехніка»)
Церклевич А. Л., д.т.н. професор (НУ «Львівська
політехніка»)
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Римар Т. Е.</i> Дослідження впливу НВЧ випромінювання на властивості гранульованих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла	6
<i>Шишкіна О. О., Шишкін О. О.</i> Вплив виду активації води на контактну зону між заповнювачем та цементним каменем	16
<i>Бліхарський Я. З.</i> Визначення коефіцієнта Пуассона для бетону з використанням методики цифрової кореляції зображення	26
<i>Дерев'яно В. М., Мороз В. Ю., Кушнірова Л. О., Мороз Л. В., Косинська К. П.</i> Вплив суперпластифікатора MC Power Flow 3100 на технічні параметри дигідрату сульфату кальцію	33
<i>Плугін А. А., Крикун О. П., Зінченко В. В., Борзяк О. С., Дудін О. А.</i> Вплив корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами на пошкодження залізобетонних шпал у колії	43
<i>Плугін А. А., Калінін О. А., Мірошніченко С. В., Зверєва А. С., Голіней В. М., Ляхов М. С.</i> Модель проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи	57
<i>Семко В. О., Юрін О. І., Магас Н. М., Норка А. Р., Пилипенко Є. Е.</i> Вибір оптимального радіуса заокруглення кута зовнішньої стіни	69
<i>Кривенко П. В., Руденко І. І., Константиновський О. П.</i> Покриття для захисту бетону від сульфатних середовищ	77
<i>Чернецька-Білецька Н. Б., Роговий А. С., Мірошникова М. В., Штиков А. Р.</i> Верифікація розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах	87
<i>Єсакова С. В., Чепурний Д. О., Купрейчик А. Ю.</i> Розрахунок фундаментних конструкцій методом деформацій	99

Геодезія та землеустрій (193)

<i>Мамонов К. А., Камчатна С. М., Орел Є. Ф., Саяпін О. С.</i> Вплив помилок у визначенні ухилу трасування на точність геодезичного обґрунтування траси	111
---	-----

Механічна інженерія (131, 132, 133)

<i>Чишкала В. О., Литовченко С. В., Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., Морозова О. М.</i> Опанування процесів синтезу оксидних сполук з застосуванням потужного джерела швидкого нагріву вихідних інгредієнтів	118
--	-----

Залізничний транспорт (273)

<i>Мартинов І. Е, Труфанова А. В., Сергієнко М. О.</i> Аналіз особливостей спрацювання кузовів пасажирських вагонів	129
<i>Крашенінін О. С., Мацегора Д. О., Польовий О. В., Пахомов М. В.</i> Управління запасами при організації сервісу локомотивного парку	140
<i>Панченко В. В., Харін Р. О.</i> Дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції	149

Транспортні технології (275)

<i>Огар О. М., Берестов І. В., Куценко М. Ю., Берестова Т. Т., Рабін В. В.</i> Визначення умов застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів	161
--	-----

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 691-405.8

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ГРАНУЛЬОВАНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РІДИННОГО СКЛА

Канд. техн. наук Т. Е. Римар

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON THE PROPERTIES OF GRANULAR HEAT INSULATION MATERIALS BASED ON LIQUID GLASS

PhD (Tech.) T. Rymar

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241543>

***Анотація.** Основними методами поліпшення експлуатаційних властивостей гранульованих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла є хімічні методи їх модифікації, які базуються на зміні їх структури завдяки використанню спеціальних інгредієнтів. При цьому виникає необхідність у введенні часто великої кількості компонентів та окремих технологічних операцій, що не завжди є технологічним. Одним з перспективних методів зміни фізичного стану речовин під дією електромагнітного поля є нетеплова обробка матеріалу надвисокочастотним (НВЧ) випромінюванням. Переваги використання НВЧ-випромінювання в порівнянні із загальноприйнятими методами модифікації матеріалів полягають у перетворенні їх структури без значних змін технологічного процесу і необхідності застосування додаткових компонентів. Завдяки об'ємному нагріву і механізму нетеплової дії НВЧ-випромінювання на оброблювальні об'єкти значно знижується тривалість їх нагріву. При НВЧ-нагріві рідинно-скляної композиції частина енергії електромагнітного випромінювання перетворюється на теплоту, яка сприяє інтенсивному спученню матеріалу, а інша її частина направлена на структурні зміни в матеріалі, які призводять до поліпшення його властивостей, що пов'язано з ефектом нетеплової дії НВЧ-випромінювання. Проведені дослідження доводять, що найкращим комплексом експлуатаційних властивостей володіють гранульовані матеріали, отримані під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт, яка відповідає температурі 110–120 °С. Необхідна тривалість такої термообробки складає 6–7 хв. Найбільш близькими до них за коефіцієнтом спучення є матеріали, отримані при конвективному нагріві при температурі 200 °С впродовж 1 год, але фізико-механічні властивості їх значно нижчі. Таким чином можна відзначити, що застосування НВЧ-випромінювання дає змогу отримати гранульовані теплоізоляційні матеріали з кращим комплексом експлуатаційних властивостей при більш низьких енергетичних витратах на їх виробництво.*

***Ключові слова:** гранульовані теплоізоляційні матеріали, рідинне скло, НВЧ-випромінювання, конвективний нагрів, експлуатаційні властивості.*

***Abstract.** The main methods of improving the performance of granular thermal insulation materials based on liquid glass are chemical methods of their modification, which are based on changing their structure through the use of special ingredients. At the same time, there is a need to*

introduce often a large number of components and individual technological operations, which is not always technological. One of the promising methods of changing the physical state of substances under the action of an electromagnetic field is non-thermal treatment of microwave radiation. The advantages of using microwave radiation in comparison with the generally accepted methods of modification of materials are the transformation of their structure without significant changes in the technological process and the need to use additional components. Due to volumetric heating and the mechanism of non-thermal action of microwave radiation on processing objects the duration of their heating considerably decreases. When microwave heating of a liquid glass composition part of the energy of electromagnetic radiation is converted into heat, which contributes to the intense swelling of the material, and the other part is aimed at structural changes in the material, which improve its properties due to the non-thermal effect of microwave radiation. Studies show that the best set of performance properties have granular materials obtained under the action of microwave radiation at a power of 650 W, which corresponds to a temperature of 110-120 °C. The required duration of such heat treatment is 6-7 minutes. The closest to them in terms of coefficient of swelling are materials obtained by convective heating at a temperature of 200 °C for 1 hour, but their physical and mechanical properties are much lower. Thus, it can be noted that the use of microwave radiation allows to obtain granular thermal insulation materials with a better set of performance properties at lower energy costs for their production.

Keywords: *granular thermal insulation materials, liquid glass, microwave radiation, convective heating, performance properties.*

Вступ. Наведені у науково-технічній літературі дані свідчать про досить широке застосування у будівництві зернистих утеплювачів на основі мінеральної сировини [1]. Прикладами таких матеріалів є сіопор (кремнезит), силікопор, бісіпор, склопор і т.ін. Сіопор виходить при спученні дробленого сіоліту – продукту взаємодії природної сировини (трепелу, опоки та інших матеріалів, які містять аморфний кремнезем) з каустичною содою. Його насипна густина 70–250 кг/м³, а теплопровідність 0,04–0,075 Вт/м·К [2]. Сировиною для виробництва силікопору служать кварцовий пісок, лужний компонент і технологічні добавки; він має середню густина 200–250 кг/м³, а теплопровідність 0,07–0,085 Вт/м·К [3]. Бісіпор виготовляють з природної сировини і лужних силікатів (рідинне скло, отримане розчиненням кремнеземистої сировини у їдкому лузі); його насипна густина коливається в межах 20–700 кг/м³, а теплопровідність 0,03–0,1 Вт/м·К [4]. На основі рідинного скла з силікат-брили і мінеральних наповнювачів отримують спучений матеріал у вигляді легких гранул

склопор, який характеризується насипною густиною 40–200 кг/м³ і теплопровідністю 0,03–0,06 Вт/м·К [5–6]. Шляхом розпилення рідинно-скляної суміші у баштовій сушарці отримують силіпор, у цьому випадку грануляція і спучення поєднані в одній операції, а матеріал відрізняється меншим, в порівнянні з склопором, розміром гранул та їх меншою теплопровідністю (0,028–0,035 Вт/м·К) [6].

Схема виробництва гранульованих матеріалів на основі рідинного скла включає чотири головні стадії: а) приготування сировинної суміші; б) грануляцію з одночасним затвердінням; в) сушіння грануляту; г) спучення грануляту при 300–500 °С.

Процес приготування рідинно-скляної композиції (РСК) для отримання бісеру здійснюється у високошвидкісному змішувачі шляхом перемішування натрієвого рідинного скла, тонкомелених мінеральних наповнювачів і спеціальних добавок. Готова РСК, що являє однорідну за складом в'язку суміш, подається на вальці або в екструдер (шнековий прес з дірчастою насадкою). Стрічка, що вийшла з екструдера, розрізається на зерна заданих

розмірів у ножовій ротаційній дробарці. Відформовані сирцеві гранули для запобігання злипанню підсушуються димовими газами, що відходять від теплових агрегатів, і надходять на низькотемпературну термообробку. Спучення сирцевого грануляту може здійснюватися в різних теплових агрегатах – сушарних барабанах, тунельних печах і печах з киплячим шаром, вертикальних сушарних вібраційних установках і т. п. [7].

Ю. П. Горлов при виробництві склопору запропонував інший вид грануляції бісеру, який полягає у використанні як середовища для формування сирцевих гранул розчину хлористого кальцію. Так, приготована РСК подається на фільтері і, проходячи крізь її отвори, розділяється на краплі. Рідинно-скляні краплі потрапляють у спеціальну ємність з розчином CaCl_2 , обладнану транспортною стрічкою. Формування гранул в розчині триває 20–30 хв. За цей час гранули набирають механічної міцності, необхідної для подальшого транспортування та спучення [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує багато робіт, присвячених підвищенню експлуатаційних характеристик гранульованих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла шляхом введення різних наповнювачів та хімічних добавок. Найбільш ранні дослідження таких матеріалів проводились московською школою Горлова Ю. П і Меркіна А. П., де було розроблено легкий мінеральний гранульований матеріал – склопор. У сировинну базу для виробництва таких матеріалів входять: натрієве рідинне скло, дрібнодисперсні мінеральні наповнювачі та спеціальні добавки. Призначення дрібнодисперсних наповнювачів – спіснення РСК, необхідне для досягнення оптимальних реологічних характеристик суміші і підвищення міцності матеріалу, як такі можуть бути використані крейда, пісок, тальк, маршаліт, каолін, оксид алюмінію, азбестовий пил та ін. Як спеціальні

гідрофобізуючі добавки, які підвищують водостійкість і спучуваність матеріалу, була застосована кремнійорганічна рідина ГКЖ [2]. Відома велика кількість робіт Кудякова А. І., Свергунової Н. А., Іванова М. Ю., в яких досліджуються процеси отримання зернистих матеріалів з добавками мікрокремнезему, золи-винос, техногенних промислових відходів, а також матеріали на основі високомодульного рідинного скла, на основі яких розроблено склади і технології отримання матеріалів із середньою густиною 70–200 кг/м³ і теплопровідністю 0,05–0,07 Вт/(м·°С) [8]. Роботи Лотова В. А. і Кутугіна В. А. присвячені дослідженню процесів формування пористої структури гранульованих матеріалів на основі рідинно-скляних композицій у присутності різних наповнювачів та хімічних добавок [9]. Підвищення ефективності теплоізоляційних матеріалів досягається і шляхом модифікації рідинного скла. Так, у роботі Страхова А. В. [10] встановлено закономірності структуроутворення теплоізоляційних матеріалів (ТІМ) на основі модифікованих силікатнатрієвих композицій, наповнених бінарними активними мінеральними добавками з використанням сировинних природних і техногенних ресурсів. У роботі Сапоровської Т. Ю. [11] для виробництва теплоізоляційних гранул було використано рідинне скло з непрореагованим діоксидом кремнію, для підвищення водостійкості і міцності до складу рідинно-скляної суміші введені добавки трепелу, опоки, аморфних відходів, що містять кремнезем, склобою боросилікатного скла. Заболотською А. В. [12] розроблено склади ТІМ на основі рідинного скла і природних силікатів (цеоліту, воластоніту, діопсиду, тремоліту), які володіють високою механічною міцністю та хімічною стійкістю.

Наведені хімічні методи модифікації рідинно-скляних композицій (РСК) з метою поліпшення експлуатаційних властивостей ТІМ базуються на зміні їх структури завдяки використанню спеціальних інгредієнтів.

При цьому виникає необхідність у введенні часто великої кількості компонентів та окремих технологічних операцій, що не завжди є виправданим, оскільки супроводжується потребою у зберіганні сировинних інгредієнтів і приготованих композицій, операцій їх транспортування, дозування, перемішування та ін. Одним з перспективних методів зміни фізичного стану речовин під дією електромагнітного поля є нетеплова обробка матеріалу НВЧ-випромінюванням. Переваги використання НВЧ-випромінювання в порівнянні із загальноприйнятими методами модифікації матеріалів полягають у перетворенні їх структури без значних змін технологічного процесу і необхідності застосування додаткових компонентів.

Як відомо, завдяки об'ємному нагріву і механізму нетеплової дії НВЧ-випромінювання на оброблювальні об'єкти значно знижується тривалість їх нагріву. Крім того при дослідженні нетеплової дії НВЧ-випромінювання на властивості полімерних матеріалів відзначається його позитивний вплив на міцнісні властивості більшості полярних полімерів. Тому вважаємо можливим поліпшення експлуатаційних властивостей ТІМ на основі рідинного скла при дії НВЧ-випромінювання.

За допомогою мікрохвильового нагріву проводяться такі важливі фізико-хімічні процеси, як дегідратація, розкладання солей і гідроксидів, синтез багатокомпонентних сполук і спікання кераміки, при цьому часові і енергетичні витрати істотно нижче, ніж при використанні традиційних методів здійснення цих процесів. Більш того, в ряді випадків шляхом мікрохвильового впливу можна домогтися результатів, яких не можна досягти за допомогою інших методів [13].

У технології силікатних матеріалів мікрохвильове випромінювання застосовується для інтенсифікації процесу отвердження композицій на основі рідинного скла та поліпшення їх властивостей [14–15].

Визначення мети та завдання дослідження. Таким чином, метою даного дослідження є вивчення впливу НВЧ-випромінювання на властивості зернистих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла в порівнянні з їх отриманням при традиційному конвективному нагріві.

Основна частина дослідження. Головною рушійною силою при спученні гранульованого рідинного скла є підвищення тиску пари води при підвищенні температури усередині самої гранули. Цей ефект досягається дією інтенсивного електромагнітного поля надвисоких частот. Під дією НВЧ-поля молекули води (диполі) рідинного скла починають здійснювати коливальні і обертальні рухи. Рух молекул – це і є теплова енергія. Чим більше води в заданому об'ємі, чим більше молекул бере участь в цьому русі, тим більше теплової енергії виділяється. Таким чином відбувається швидке розігрівання за усім об'ємом зразка [16].

Мікрохвильова обробка має ряд переваг перед звичайними методами нагріву конденсованих середовищ (твердих тіл і рідин), до яких належать висока швидкість і низька інерційність нагріву, відсутність контакту тіла, що нагрівається, і нагрівача, однорідність нагріву матеріалу за усім об'ємом, можливість вибіркового нагріву компонентів суміші і високий коефіцієнт корисної дії [17]. До того ж, НВЧ-енергія не вносить забруднень при нагріві, при її використанні відсутні будь-які продукти згорання. Легкість, з якою НВЧ-енергія перетворюється на тепло, дає змогу отримати дуже великі швидкості нагріву, при цьому в матеріалі не виникає руйнівних термомеханічних напруг. Генераторне обладнання повністю електронне і працює практично безінерційно, завдяки чому рівень потужності НВЧ і момент її подачі можна миттєво змінювати [18]. Тому здійснення термоспучення вихідної РСК при виробництві ТІМ за допомогою надвисокочастотних струмів замість

традиційного конвективного нагріву є високоперспективним.

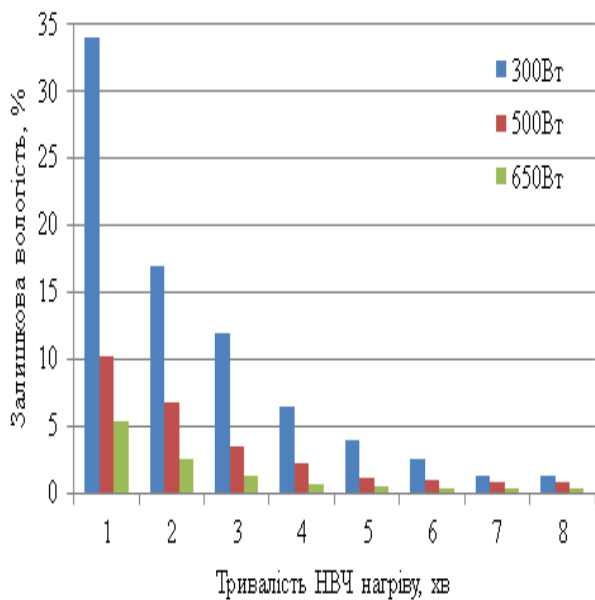
Методика проведення дослідження.

РСК для гранульованих ТІМ готується шляхом перемішування рідинного скла і мінеральної добавки, призначення якої – збільшення частки твердої фази у вихідній суміші, і як наслідок, зменшення впливу вільної води на поризаційну здатність РСК. Грануляція РСК проводиться у розчині хлориду кальцію, після чого отриманий гранулят сушать до досягнення матеріалом залишкової вологості ~50 %. Далі відбувається спучення гранул під дією НВЧ-випромінювання або при конвективному нагріві.

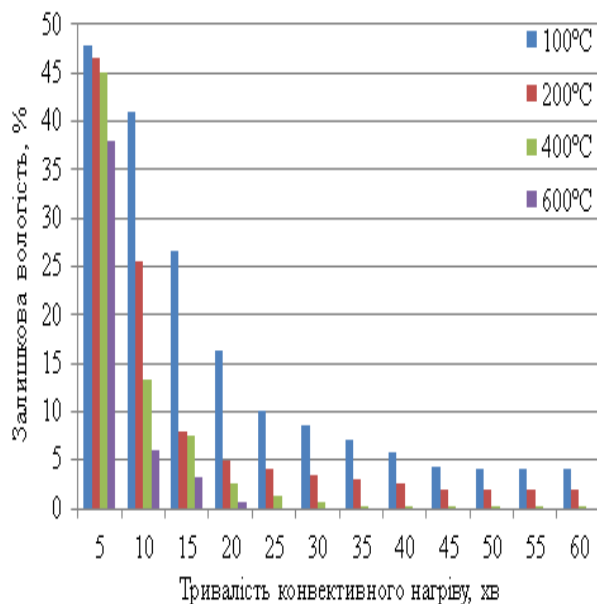
Проведення досліджень відбувалось в НВЧ-установці із стандартною робочою частотою, яка становить 2,45 ГГц, при вихідній потужності 300, 500, 650 Вт, яким відповідають температури зразків 55–60, 100–110, 110–120 °С, та у сушарній шафі при температурах 100, 200, 400, 600 °С.

При термічному спученні РСК основним пороутворювачем є вода. Класифікують вологовміст у сировинних сумішах таким чином: капілярна вода, яка утримується капілярними силами; адсорбційно зв'язана вода, яка утримується силами Ван-дер-Ваальса у кількості двох – трьох молекулярних шарів, видаляється при температурі понад 100 °С; хімічно зв'язана вода, входить у гідратні новоутворення. Якщо така вода пов'язана основними валентностями, то вона випаровується при температурі 300–500 °С. У кристалогідратах вона може бути зв'язана у вигляді іонів або молекул і утримується у решітці координаційними зв'язками, видаляється при температурі 200–300 °С [19].

З метою дослідження видалення усіх типів води при спученні гранульованого матеріалу була визначена залежність зміни його залишкової вологості від параметрів НВЧ і конвективного нагріву, а також коефіцієнт спучення гранул (рис. 1, 2).



а



б

Рис. 1. Залежність залишкової вологості від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

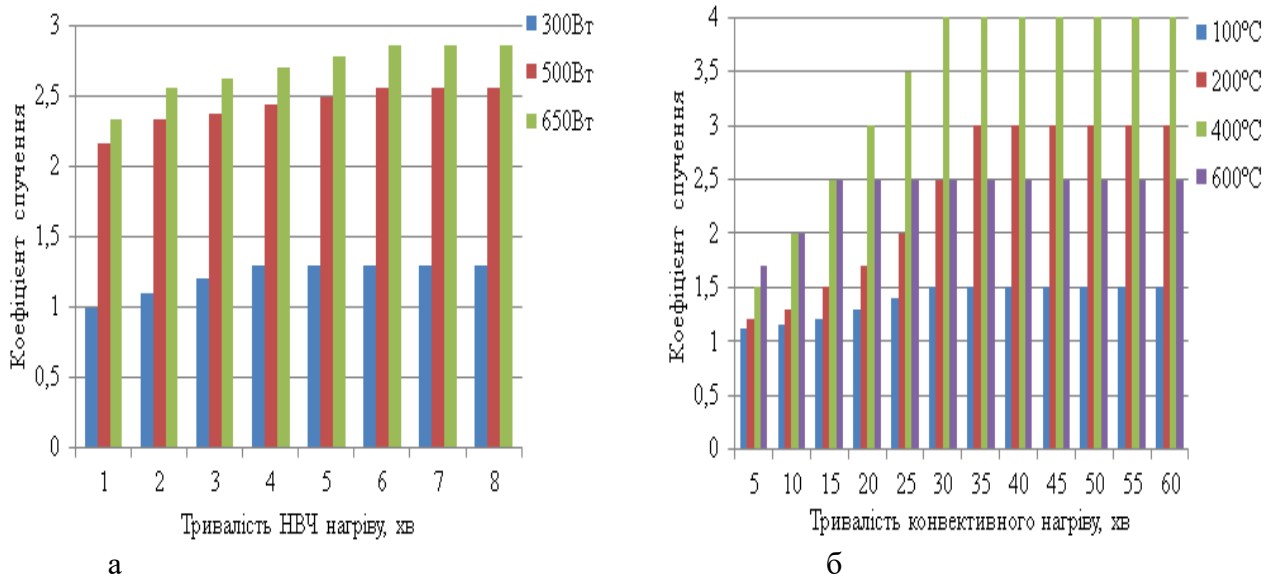


Рис. 2. Залежність коефіцієнта спучення від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

З наведених даних видно, що при потужності випромінювання 300 Вт гранули практично не спучились, а зниження залишкової вологості відбувається незначно при поступовому випаровуванні вільної води, оскільки дана потужність замала для інтенсифікації процесу спучення (температура в НВЧ-установці сягає значення лише 55–60 °С). Аналогічні закономірності характерні для процесу спучення гранул при конвективному нагріві при температурі 100 °С. Якщо порівнювати процес спучення гранул за однакових температур (100 °С відповідає потужності установки 500 Вт), то видно, що під дією НВЧ-випромінювання при даній температурі процес спучення відбувається доволі інтенсивно, коефіцієнт спучення гранул дорівнює 2,56, тоді як при конвективному нагріві максимум 1,5, а залишкова вологість дорівнює 0,8 і 4 % відповідно.

Зі збільшенням потужності НВЧ-випромінювання і температури конвективного нагріву швидше відбувається видалення води і збільшення об'єму гранул, однак за деяким виключенням. Так, при температурі 600 °С починається зменшення об'єму спученої структури, в порівнянні з температурами

200 і 400 °С, що пояснюється кристалізацією силікату натрію. Під дією НВЧ-випромінювання набагато швидше відбувається видалення води при спученні гранул. Так, початкова вологість гранул складає ~50 % і при максимальній потужності випромінювання 650 Вт (яка відповідає температурі 110–120 °С) вже на першій хвилині процесу відбувається інтенсивне спучення гранул до коефіцієнта 2,33 і через 1 хв спучення залишкова вологість знижується до 5,4 %. Постійне значення залишкової вологості досягається на 6 хв спучення, а коефіцієнт спучення при цьому сягає свого максимального значення 2,86. При конвективному нагріві зниження залишкової вологості до 5–6 % спостерігається при температурі 200 °С через 20 хв спучення, при 400 °С – через 16 хв і при 600 °С – через 10 хв. Постійного ж значення залишкова вологість при даних температурах досягає через 50, 40 і 30 хв нагріву відповідно та дорівнює 2, 0,2 і 0 %. Якщо порівнювати значення коефіцієнта спучення гранул, то можна зазначити, що при температурах конвективного нагріву 200 і 400 °С він сягає свого максимального значення 3 і 4 відповідно, але при даних температурах значно різняться грануло-

метричний склад спученого матеріалу, так, діаметри спучених при 200 °С гранул перебувають у межах від 10 до 15 мм, а при 400 °С – від 10 до 20 мм. До того ж, такий великий діаметр гранул призводить до зниження їх міцності. Гранулометричний склад гранул, спучених під дією НВЧ-випромінювання, більш однорідний, діаметр гранул дорівнює 6–8 мм, які характеризуються доволі високою міцністю.

Таким чином, можна зауважити, що використання НВЧ-нагріву в порівнянні з

традиційним конвективним способом дає змогу зменшити тривалість процесу термічної обробки, що в свою чергу призводить до значного зниження енергоємності отримання матеріалу.

Змінюючи параметри НВЧ-нагріву, можна не тільки управляти процесом спучення гранул, але і впливати на властивості спучених матеріалів. Основні властивості гранульованого ТМ залежно від параметрів НВЧ і конвективного нагріву наведені на рис. 3–6.

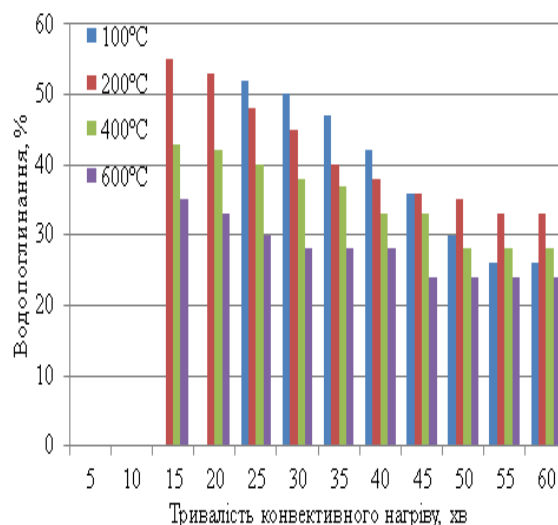
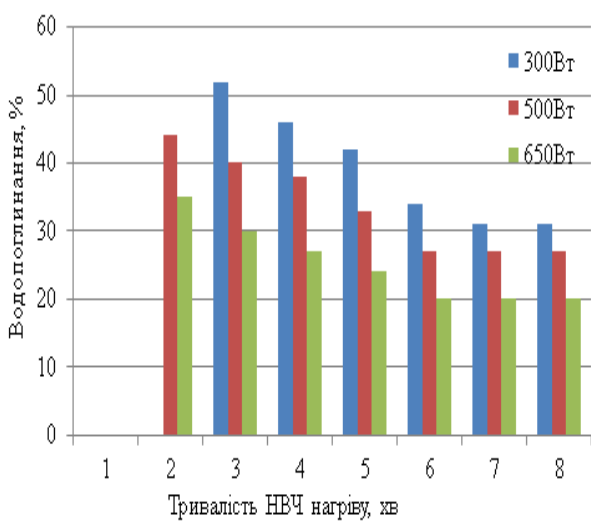


Рис. 3. Залежність водопоглинання від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

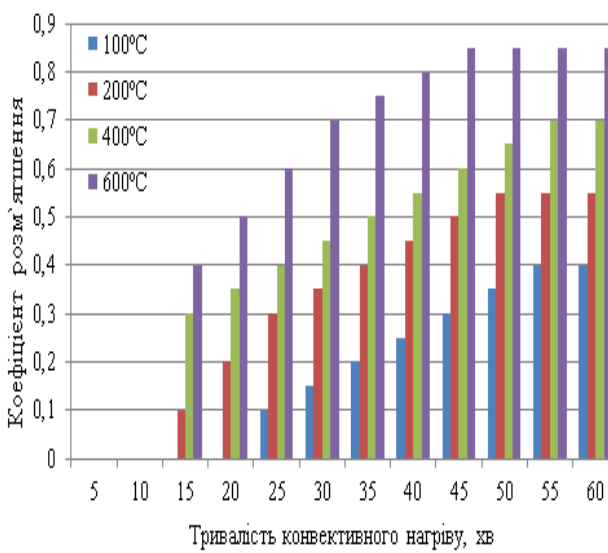
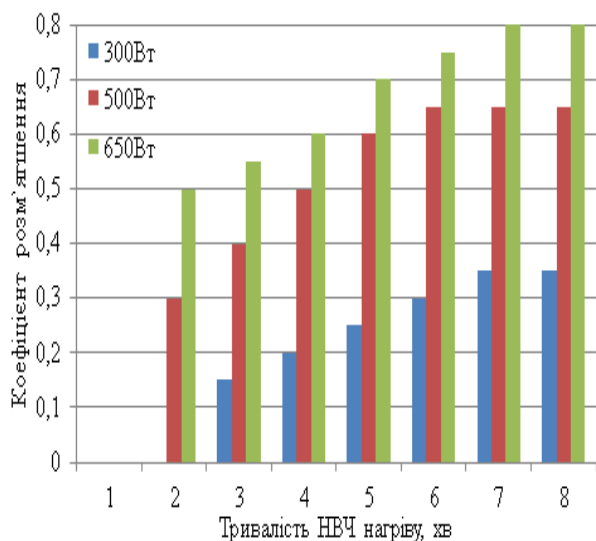


Рис. 4. Залежність коефіцієнта розм'якшення від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

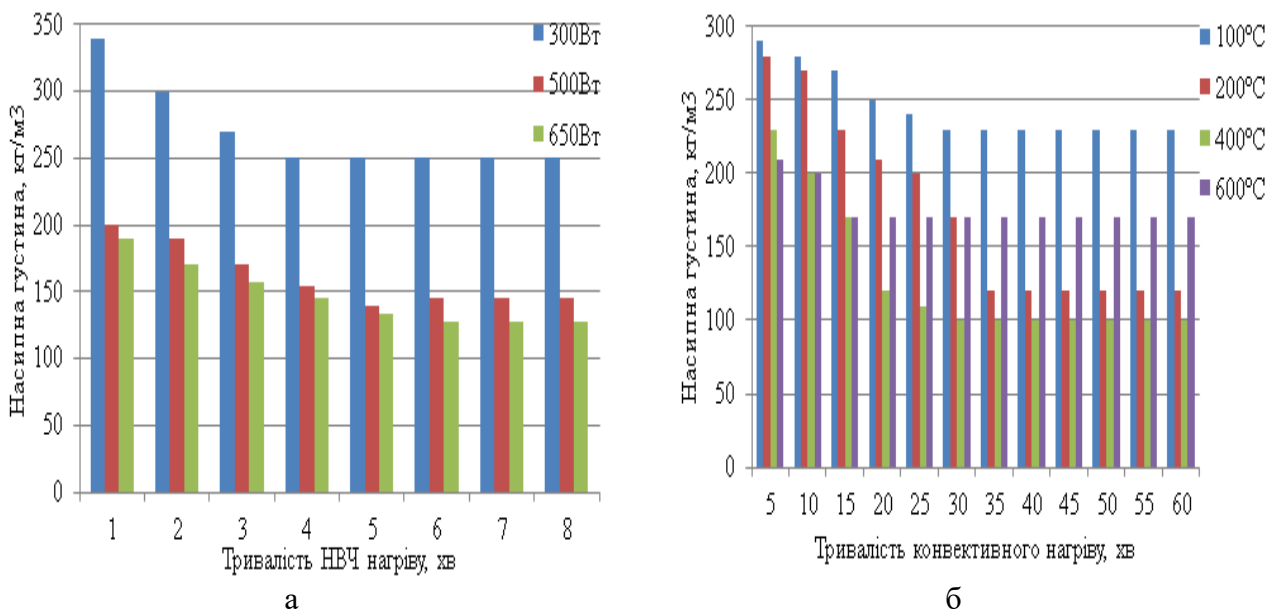


Рис. 5. Залежність насипної густини від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

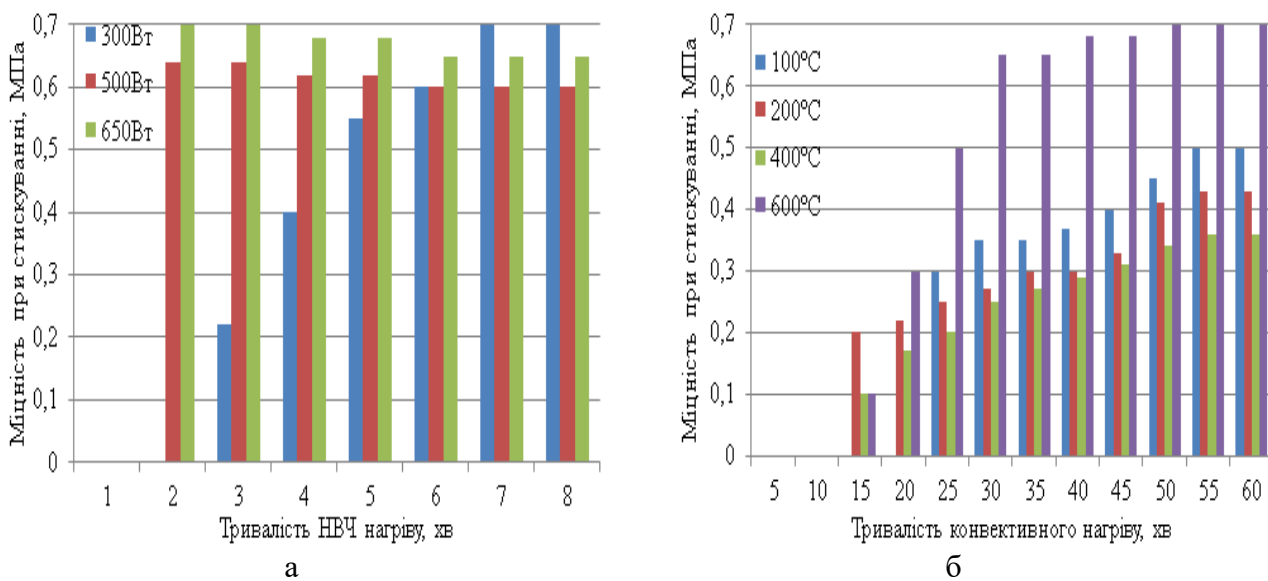


Рис. 6. Залежність міцності при стискуванні від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

Випробування на водопоглинання, водостійкість і міцність проводилось на зразках, які спучились та мають достатньо міцну поверхневу оболонку, тому для даних досліджень не були використані зразки, спучення і отвердження яких відбувалось впродовж 1 хв під дією НВЧ-випромінювання та 5–10 хв при конвективному нагріві.

Водостійкість гранульованих матеріалів оцінювалась за коефіцієнтом розм'якшення при водопоглинанні, тобто за відношенням міцності матеріалу, насиченого водою, до його міцності в сухому стані.

Завдяки утворенню закритопористої структури гранул під дією НВЧ-випромінювання показники водопоглинання таких зразків мають майже вдвічі менші

значення, ніж у випадку конвективного нагріву. Поглинання води перешкоджає оплавленій і більш щільній поверхневій шару гранул, що утворюється під дією НВЧ-випромінювання. Навіть при найбільшій температурі 600 °С водопоглинання через 45–60 хв нагріву складає 24 %, тоді як при дії НВЧ-випромінювання на зразки впродовж 6–8 хв водопоглинання складає 20 %. При підвищенні температури до 400–600 °С у спученні бере участь зв'язана вода, що позитивно впливає на пористу структуру гранул, в якій переважає частка закритих пор і відбувається зменшення водопоглинання зразків.

Аналогічні закономірності простежуються і у випадку дослідження водостійкості матеріалів. Найбільш водостійкими є гранули, спучення і отвердження яких проводилось при 600 °С впродовж щонайменше 50 хв, що в 10 разів перевищує тривалість процесу в НВЧ-установці. Також водостійкими є гранульовані матеріали, отримані під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт, оскільки значення коефіцієнта розм'якшення дорівнює 0,8 та при 400 °С, $K_p = 0,75$. Решта ж матеріалів не є водостійкими, оскільки коефіцієнт їх розм'якшення менше 0,7.

Визначення міцності гранульованого матеріалу відбувалось при стискуванні його в циліндрі до 20 % деформації.

З даних рис. 5 видно, що зі збільшенням температури і тривалості термообробки, як у разі НВЧ, так і у разі конвективного нагріву, спостерігається зниження насипної густини гранульованого матеріалу внаслідок підвищення коефіцієнта його спучення, обумовлене видаленням хімічно зв'язаної води при підвищенні температури. Виняток складає процес спучення гранул при температурі 600 °С, оскільки, як було зазначено вище, відбувається кристалізація силікату натрію, яка значно активізує процес отвердження РСК, що ускладнює процес поризації, внаслідок чого коефіцієнт спучення має

майже в два рази менше значення, ніж при температурі 400 °С, а насипна густина таких зразків складає 170 кг/м³, тоді як при температурі 400 °С – всього 100 кг/м³. Однак зі зниженням насипної густини відбувається зниження і міцності гранул.

Слід зауважити, що міцність гранул зростає впродовж тривалості термообробки, і незважаючи на те, що об'єм гранул після 30 хв термообробки вже майже не змінюється, наростання міцності відбувається і далі, і свого постійного значення міцність у більшості випадків сягає після годинної термообробки, що пояснюється процесами структуроутворення.

Насипна густина гранульованого матеріалу, отриманого під дією НВЧ-випромінювання, має більше значення, що обумовлено меншим коефіцієнтом спучення, мінімальне її значення складає 127 кг/м³ і досягається воно при потужності НВЧ-випромінювання 650 Вт. Але якщо порівнювати міцність зразків з однаковою насипною густиною, які отримані при НВЧ і конвективному нагріві, можна відзначити, що міцність зразків у випадку НВЧ-випромінювання має в 1,5 рази більше значення, до того ж тривалість термообробки більше майже вдесятеро. Так, якщо міцність гранул, отриманих під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт, має значення 0,65 МПа після 6 хв термообробки, то міцність гранул, отриманих при 200 °С при конвективному нагріві, має значення всього 0,43 МПа і досягається воно після майже годинної термообробки. Найбільш близькими за показниками міцності 0,65 МПа є гранули, отримані при температурі 600 °С впродовж 30 хв термообробки, але насипна густина таких гранул в 1,3 рази вище і дорівнює 170 кг/м³.

З проведених досліджень можна зробити висновок, що найліпшим комплексом експлуатаційних властивостей володіють гранульовані матеріали, отримані під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт. Необхідна тривалість такої термообробки складає 6–7 хв.

Найбільш близькими до них за коефіцієнтом спучення є матеріали, отримані при конвективному нагріві при температурі 200 °С впродовж 1 год, але фізико-механічні властивості їх значно нижчі.

Висновки. Таким чином, можна сказати, що особливістю НВЧ-нагріву РСК є те, що частина енергії електромагнітного випромінювання перетворюється на теплоту, яка сприяє інтенсивному спученню матеріалу, а інша її частина направлена на структурні зміни в матеріалі, які призводять до поліпшення його властивостей, що пов'язано з ефектом нетеплової дії НВЧ-випромінювання. Механізм нетеплової дії НВЧ електромагнітних коливань на структуру РСК можна пояснити так: НВЧ електромагнітне поле викликає послаблення

міжмолекулярних сил, при цьому молекули води безперервно змінюють орієнтацію, утворюючи електричне поле, збільшуються теплові коливання і зростає інтенсивність крутильних коливань, що створює додаткові енергетичні можливості для утворення нових міжмолекулярних взаємодій, а саме інтенсивної полімеризації РС і встановлення додаткових поперечних зв'язань, що підвищує міцність матеріалу.

З проведених досліджень можна зробити висновок, що із застосуванням НВЧ-випромінювання вдається отримати гранульовані ТІМ з кращим комплексом експлуатаційних властивостей при більш низьких енергетичних витратах на їх виробництво.

Список використаних джерел

1. Иванов М. Ю. Разработка технологий управления поровой структурой зернистых теплоизоляционных материалов на основе силикат-натриевых композиций. *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 2 (22). С. 102–107.
2. Собченко В. В. Розробка енергозберігаючої технології виробництва пористих заповнювачів із гідросилікатів в апаратах псевдозрідженого шару: автореф. дис... канд. техн. наук. Київ, 2006. 22 с.
3. Тарасова И. Д. Низкотемпературный синтез жидкого стекла и получение теплоизоляционных материалов на его основе: автореф. дисс... канд. техн. наук. Белгород, 2005. 20 с.
4. Развитие производства эффективного минерального теплоизоляционного материала «БИСИПОР» / О. В. Крифукс и др. *Строительные материалы*. 2003. № 11. С. 26–27.
5. Меркин А. П. Сверхлегкий минеральный гранулированный материал – стеклопор. *Строительные материалы*. 1976. № 9. С. 10–12.
6. Горлов Ю. П. Технологии теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Москва: Высш. шк., 1989. 384 с.
7. Юцис И. И. Новое технологическое оборудование для производства теплоизоляционных материалов. Москва: Стройиздат, 1985. 36 с.
8. Кудяков А. И., Свергунова Н. А., Иванов М. Ю. Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: монография / под ред. А. И. Кудякова. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 204 с.
9. Лотов В. А., Кутугин В. А. Формирование пористой структуры пеносиликатов на основе жидкостекольных композиций. *Стекло и керамика*. 2008. № 1. С. 6–10.
10. Страхов А. В. Теплоизоляционный материал на основе силикатнатриевого связующего, модифицированного активными минеральными добавками: автореф. дис... канд. техн. наук: Саратов, 2011. 22 с.
11. Сапоровская Т. Ю. Исследование конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе силикатного гранулированного заполнителя: автореф. дис... канд. техн. наук. Владимир, 2000. 20 с.

12. Заболотская А. В. Технология и физико-химические свойства пористых композиционных материалов на основе жидкого стекла и природных силикатов: автореф. дис... канд. техн. наук. Томск, 2003. 20 с.
 13. Ванецев А. С., Третьяков Ю. Д. Микроволновый синтез индивидуальных и многокомпонентных оксидов. *Успехи химии*. 2007. № 76 (5) С. 435–453.
 14. Małachowska A., Stachowicz M., Granat K. Innovative microwave hardening of water-glass containing sandmixes in technical-economic approach. *Archives of foundry engineering*. 2012. № 12. P. 75–80.
 15. Granat K., Nowak D., Pigieli M., Stachowicz M., Wikiera R. Microwaves energy in curing process of water glass molding sands. *Archives of foundry engineering*. 2007. № 7. P. 183–188.
 16. Евсина Н. А. Анализ способов сушки капиллярно-пористых материалов и методов их автоматизации. *Вестник Нац. ун-та «ХПИ»*: сб. науч. тр. Темат. вып.: Автоматика и приборостроение. Харьков: НТУ «ХПИ». 2011. № 57. С. 88–91.
 17. Морозов О. Г., Самигуллин Р. Р., Насыбуллин А. Р. Микроволновые технологии в процессах переработки и утилизации бытовых полимерных отходов. *Известия Самарского центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12. № 493. С. 580–582.
 18. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко и др. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2010. № 3. С. 2–6.
 19. Лыков А. Л. Теория сушки. Москва: Энегррия, 1968. 472 с.
-

Римар Тетяна Ернстівна, канд. техн. наук, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, м. Северодонецьк, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>. Тел.: +38(050)1521443. E-mail: rymartatyana1975@gmail.com.

Rymar Tatyana PhD (Tech.), Associate Professor of Chemical Engineering and Ecology Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>. Tel.: +38(050)1521443. E-mail: rymartatyana1975@gmail.com.

Статтю прийнято 16.02.2021 р.

УДК 691.32

ВПЛИВ ВИДУ АКТИВАЦІЇ ВОДИ НА КОНТАКТНУ ЗОНУ МІЖ ЗАПОВНЮВАЧЕМ ТА ЦЕМЕНТНИМ КАМЕНЕМ

Канд. техн. наук О. О. Шишкіна, д-р техн. наук О. О. Шишкін

INFLUENCE OF THE TYPE OF WATER ACTIVATION ON THE CONTACT ZONE BETWEEN THE FILLER AND THE CEMENT STONE

Cand. tech. Science O. O. Shyshkina, Dr. Tech. Science O. O. Shyshkin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241651>

Анотація. У роботі розглянуто вплив електромагнітної, електрохімічної та фізико-хімічної активації води замішування на міцність дрібнозернистого бетону. Наведено порівняння міцності бетонів, які отримано при замішуванні компонентів активованою водою, із застосуванням різного виду заповнювачів. Виявлено вплив активації води замішування на міцність контактної зони між цементним каменем і заповнювачем, а також на міцність бетону.

Ключові слова: активація, вода, замішування, бетон, міцність, контракція, контактна зона.

Abstract. Among the many ways to improve the preparation of concrete mix is to modify the properties of cement systems by mechanical, physical, chemical and combined effects. One of the directions of activation of the concrete mixture is the activation of its components, namely: electromagnetic, electrochemical and physics-chemical activation of mixing water. The most accessible and technological of them is the physics-chemical activation of water and aqueous solutions by certain organic substances used in ultra-low concentrations, followed by their use as a mixing fluid for building mixtures. The purpose of the study was to perform a comparative assessment of the effect of electromagnetic, electrochemical and physicochemical activation of water on the properties of cement paste and fine-grained concrete. To achieve this goal, the degree of influence of electromagnetic, electrochemical and physicochemical activation of water on the contraction and hardening time of cement paste, as well as the degree of influence of electromagnetic, electrochemical and physicochemical activation of water on compressive strength of fine concrete. It is established that the type of activation of kneading water affects the hardening time of the cement paste and the normal density. The shortest hardening times are set for cement paste, which is obtained on electrochemically activated alkaline water, and the longest with the use of physics-chemical activation. At the same time, the highest strength at the lowest contraction has concrete, which is obtained on physics-chemical activated water. This concrete has the highest rate of strength. Concretes obtained on «alkaline» water, after its electro-chemical activation, have a high rate of strength formation and its value, but high contraction, which leads to cracking of concrete.

Keywords: activation, mixing water, concrete, strength, contraction, contact zone.

Вступ. Зростаючий інтерес до використання монолітного бетону та залізобетону вимагає вирішення важливих завдань щодо підвищення ефективності монолітного будівництва.

Існують чіткі уявлення про макро-, мезо- і мікроструктури бетону, які дуже схожі за будовою, але відрізняються масштабом і речовим складом. Таким чином, головною особливістю бетону, яку відзначають, аналізуючи його структуру, є ієрархічність і подібність будови на всіх рівнях структури. На всіх масштабних рівнях бетон залишається композитним матеріалом, і його структури найбільшою мірою відповідають моделі типу «матриця – включення». У таких моделях, як включення, розглядаються зерна заповнювача, а також частинки негідратованого цементу (залежно від рівня), а як матриця – цементний камінь або гідратні фази (найчастіше це гель C-S-H). Така ідеалізація структури дозволяє прогнозувати міцність бетону. Але на основі незалежних досліджень структура бетону, який

розглядався раніше з точки зору механіки композита як двокомпонентний матеріал, поповнилася новою структурною одиницею – контактною зоною. На сьогодні при прогнозуванні міцності і довговічності бетону розглядають вже не контакт між двома компонентами, єдиною характеристикою якого була міцність, а приконтактну зону в цементному камені, що характеризується також специфічною пористістю і складом гідратних фаз. Ці параметри контактної зони істотно відрізняються від аналогічних властивостей цементного каменю в іншому об'ємі бетону.

Стан контакту між зернами заповнювача і цементним каменем впливає на їх спільну роботу під навантаженням, а також на цілісність структури і стійкість бетону. Деякі заповнювачі здатні до хімічної взаємодії та фізико-механічного зрощування з продуктами гідратації цементу, що призводить до посилення їх зчеплення із цементним каменем.

Водночас за останні роки виконано ряд досліджень, в результаті яких

позначилися помітні зрушення в підвищенні рівня організації і технології зведення монолітних будівель і споруд, у тому числі за рахунок удосконалення технології приготування бетонної суміші. Одним з напрямів у сфері вдосконалення цієї технології є активація вихідних компонентів, зокрема води замішування. Існуючі методи активації води практично не вимагають зміни основного технологічного процесу приготування бетонної суміші, проте істотно сприяють поліпшенню її технологічних властивостей (легкоукладальність, здатність до перекачування), фізико-механічних (міцність, морозостійкість, водонепроникність) та експлуатаційних властивостей бетону, а також дозволяють керувати процесом твердіння і знижувати витрату цементу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Приготування будівельної суміші – найважливіший технологічний етап у комплексі бетонних робіт. У процесі приготування формується потенційний рівень характеристик якості бетону, який не може бути підвищений на наступних технологічних етапах.

Заповнювач, що вважається інертною складовою, насправді відіграє активну роль у формуванні структури цементної системи і набуття нею певних властивостей. При внутрішньому водовідділенні волога може накопичуватися під зернами заповнювача, послаблюючи зв'язок між ними і цементним каменем. Уздовж зони контакту заповнювача з цементним каменем розвиваються внутрішні усадочні тріщини, порушується монолітність, однорідність, що призводить до анізотропії механічних властивостей і сприяє зростанню проникності бетонного композита та зменшенню його міцності. Стан контакту між зернами заповнювача і цементним каменем впливає на спільну роботу каменеподібної складової і мінерального клею під навантаженням, а також на цілісність конгломератної структури і стійкість бетону. Міцність цього контакту

залежить від природи заповнювача, його пористості, шорсткості і чистоти поверхні, а також від виду й активності цементу, водоцементного відношення та умов твердіння бетону [1]. Контактна зона – це область цементного каменю (товщиною 35...50 мкм) біля поверхні заповнювача, яка має особливі властивості. Формування контактної зони в бетоні обумовлено такими факторами [2]: менш щільна упаковка цементних частинок біля поверхні заповнювача, що властиво поведінці будь-якої дисперсної фази поблизу плоскої поверхні. Це явище називають «ефектом стіни». Молекули адсорбованої води, яка відрізняється більш високою щільністю і впорядкованістю, здатні витіснити частки цементу з поверхні заповнювача. В результаті водоцементне відношення і, як наслідок, пористість біля поверхні заповнювача також істотно збільшуються, а міцність цементного каменю зменшується. За результатами експериментальних даних [3], у віці 28 діб пористість контактної зони в бетонах на щільному заповнювачі складає в середньому 35 %, а в цементному камені – 7 %. У процесі укладання бетонної суміші часто відбувається розшарування. Причому ззовні це не завжди помітно, не дивлячись на те, що воно практично завжди має місце всередині структури. Вода, як найлегший компонент в бетонній суміші, піднімаючись вгору, затримується під зернами заповнювача, і в результаті утворюються седиментаційні пори. При малих водоцементних відношеннях внутрішнє розшарування менш помітно, проте структура контакту під зернами заповнювача завжди формується більш пухкою. Контактна зона має відносно стабільні особливості структури.

Серед численних технологічних прийомів удосконалення властивостей бетонної суміші і бетону є модифікування властивостей компонентів цементних систем механічними, фізичними, хімічними і комбінованими впливами. Найбільш поширеними методами модифікування

властивостей компонентів цементних систем на цей час є активація її компонентів, а саме електромагнітна (ЕМА) [4-6], електрохімічна (ЕХА) і фізико-хімічна [7, 8] активація води замішування.

Використання методів активації компонентів суміші електричним полем впливає як на процеси коагуляції, структуро- і гідратуотворення, так і виникнення конденсаційно-кристалізаційної структури цементного каменю, яка утворюється за рахунок безпосередньої хімічної взаємодії частинок цементу. Недоліком відомих способів є великі енерговитрати на реалізацію способу виготовлення і забезпечення міцності бетону в ранні терміни.

При застосуванні електромагнітної (ЕМА) та електрохімічної (ЕХА) активації води остання набуває позитивного заряду, величина її показника рН перевищує 7,0. Тобто вода стає «лужною», що обумовлює підвищення міцності цементного каменю до 20 % [5]. Дослідженнями авторів [6] показано, що замішування цементу з електрохімічно активованою («лужною») водою підвищує розтікання цементного тіста при одночасному підвищенні пластичної міцності у 2,2 разу.

Водночас відомо, що зменшення величини рН води замішування менше за 7,0 (що свідчить про переведення її у «кислий» стан) також призводить до підвищення міцності цементного каменю до 20 % [7-9], тобто не менше ніж при застосуванні «лужної» води.

Вочевидь, найбільш доступною і технологічною з відомих методів активації води є фізико-хімічна активація наномодифікаторами (які застосовуються у надмалих концентраціях) води і водних розчинів з подальшим використанням їх як рідини замішування будівельних сумішей [9]. Однак систематичні дослідження у напрямі впливу фізико-хімічно активованої води на міцність контакту між цементним каменем і заповнювачем до теперішнього часу не є достатніми, а порівняльний аналіз

різноманітних методів активації води у цьому питанні зовсім відсутній.

Визначення мети та завдання дослідження. За мету досліджень, результати яких викладено в роботі, поставлено дослідження впливу виду активації води на контактну зону між заповнювачем та цементним каменем через міцність бетону при стиску.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- визначити міцність дрібнозернистого бетону залежно від виду заповнювача при застосуванні води, активованої різними методами;

- теоретично обґрунтувати вплив виду активації води на властивості контактної зони між заповнювачем та цементним каменем.

Основна частина дослідження. Вплив виду активації води на міцність контактної зони між заповнювачем і цементним каменем визначався опосередковано через міцність дрібнозернистого бетону. У дослідженнях для виготовлення бетону використовували портландцемент М400 (ПрАТ «Кривий Ріг цемент»), як заповнювачі – річковий кварцовий пісок, доменний гранульований шлак та відходи збагачення залізних руд (ПрАТ «Міталстіл Кривий Ріг»), які мали розмір частинок 2–2,5 мм (отримано відсіюванням означеної фракції на ситах). Означені заповнювачі обрано через наявність різного потенціалу їх поверхні. За даними [10], на поверхні частинок кварцового піску середня величина Z-потенціалу становить -13,5 mV, на поверхні частинок шлаку -10,7 mV, частинки відходів збагачення залізних руд містять на своїй поверхні як позитивно, так і негативно заряджені активні центри.

«Лужну» воду отримували внаслідок ЕХА на приладі ZENOR. ЕМА води здійснювали пропусканням її через трубчастий постійний магніт для виключення одночасної дії електричного поля. «Кислу» воду одержували додаванням наномодифікатора – олеату натрію

(Simagchem Corp., Китай) – у вигляді водного розчину концентрацією 0,00004 %, яка визначена як оптимальна в попередніх дослідженнях. Компоненти бетонної суміші дозували в необхідних відповідно до плану експерименту кількостях (при отриманні бетону кількість заповнювача вираховували через його щільність, так щоб його об'єм дорівнював об'єму цементу) і перемішували в лабораторному змішувачі протягом 3 хв. Отримана суміш укладалася в металеву форму, яка має розмір сторін 40x40x160 мм. Форму, що містить виготовлену суміш жорстко закріплювали на лабораторному вібромайданчику й піддавали дії вібрації до повного ущільнення, яке характеризувалося припиненням осідання суміші й виділення бульбашок повітря. Після завершення укладання та ущільнення бетонної суміші у формі відкриту поверхню зразка загладжували кельмою. Перші 24 години зразки бетону тверділи в нормальних умовах, при цьому їх до розпалубки зберігали у формах, покритих вологою тканиною. Це виключало можливість випаровування з них вологи в приміщенні з температурою повітря 293 ± 5 К. Через 24 години після виготовлення зразки бетону виймали з форм та поміщали в камеру, яка забезпечувала температуру 293 ± 3 К і відносну вологість повітря 95 ± 5 %. Величину контрольованих показників якості цементного тіста та

бетону визначали згідно з діючими стандартами.

Теоретичні дослідження проводилися шляхом аналізу відповідності визначених раніше процесів формування структури і властивості систем на основі портландцементу та структурованої води за відомими законами колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки дисперсних систем. За теоретичну основу для розвитку вказаних подань використані такі фундаментальні положення: теорії міцелярного каталізу [11], колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки дисперсних систем [12], ефекту надмалих доз [13], теорії електрогетерогенних взаємодій при твердінні цементних в'язучих [14, 15].

У результаті досліджень впливу активованої води замішування на міцність дрібнозернистого бетону при стиску у віці 28 діб встановлено (табл. 1–3), що найбільше підвищення міцності спостерігається у бетонів, отриманих на основі «кислої» води. В цьому випадку міцність підвищується порівняно з міцністю бетону контрольованого складу (виготовленого на неактивованій воді) на 10–58 %. При цьому найменше підвищення міцності розчину спостерігається у складах, отриманих на ЕМА воді. Паралельно були випробувані зразки цементного каменю, виготовленого з того самого цементу, що й бетон, при водо-цементному відношенні такому самому, як і в бетоні.

Таблиця 1

Міцність бетону та цементного каменю при застосуванні як заповнювача річкового піску

Вид води замішування	Міцність при стиску		Відношення міцності бетону до міцності цементного каменю
	цементний камінь	бетон	
Звичайна вода	86,6/100	33,8/100	0,39
«Лужна» вода	104,0/120	38,5/114	0,37
ЕМА вода	98,5/114	37,2/110	0,38
«Кисла» вода	108/125	45,6/135	0,42

Примітка. В чисельнику наведено міцність при стиску, МПа, в знаменнику – відносну міцність, %.

Таблиця 2

Міцність бетону та цементного каменю при застосуванні як заповнювача доменного гранульованого шлаку

Вид води замішування	Міцність при стиску		Відношення міцності бетону до міцності цементного каменю
	цементний камінь	бетон	
Звичайна вода	86,6/100	34,8/100	0,40
«Лужна» вода	104,0/120	40,7/117	0,39
ЕМА вода	98,5/114	41,1/118	0,42
«Кисла» вода	108/125	46,6/134	0,43

Примітка. В чисельнику наведено міцність при стиску, МПа, в знаменнику – відносну міцність, %.

Таблиця 3

Міцність бетону та цементного каменю при застосуванні як заповнювача відходів збагачення залізних руд

Вид води замішування	Міцність при стиску		Відношення міцності бетону до міцності цементного каменю
	цементний камінь	бетон	
Звичайна вода	86,6/100	36,8/100	0,42
«Лужна» вода	104,0/120	42,7/116	0,41
ЕМА вода	98,5/114	43,8/119	0,44
«Кисла» вода	108/125	53,4/145	0,49

Примітка. В чисельнику наведено міцність при стиску, МПа, в знаменнику – відносну міцність, %.

Як показали результати досліджень, підвищення міцності бетону, виготовленого на активованій воді, відносно міцності бетону контрольного складу відбувається не пропорційно збільшенню міцності цементного каменю.

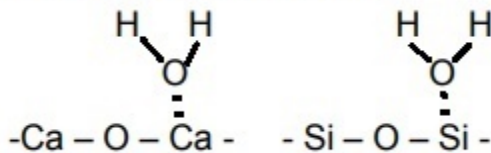
Означене свідчить, що в бетонах на активованій воді відбувається не тільки збільшення міцності цементного каменю, а й зміна міцності контактної зони заповнювача з цементним каменем. Але міцність контактної зони заповнювача з цементним каменем і міцність цементного каменю змінюються не однозначно. При застосуванні річкового піску, у якого найбільше негативне значення Z-потенціалу поверхні при використанні «лужної» та ЕМА води, приріст міцності бетону «відстає» від приросту міцності цементного каменю. Вочевидь, це відбувається через недостатній приріст міцності контактної зони між заповнювачем і цементним

каменем. Навпаки, при застосуванні «кислої» води приріст міцності бетону практично пропорційний приросту міцності цементного каменю, що свідчить про найбільш високу міцність контактної зони.

Таким чином, попередня активація води замішування за рахунок збільшення міцності цементного каменю та контактної зони між ним і заповнювачем дозволяє підвищити міцність цементних композицій, особливо при застосуванні «кислої» води.

На підставі викладеного теоретичну модель початкової фази формування контактної зони між заповнювачем та цементним каменем при застосуванні активованої води можна подати таким чином.

При використанні електромагнітної (ЕМА) та електрохімічної (ЕХА) активації води, внаслідок чого вода отримує позитивний заряд, відбувається гідроксилування поверхні цементу



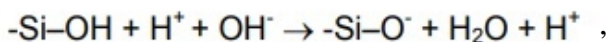
та поверхні заповнювачів, яка має негативний заряд (табл. 4).

Таблиця 4

Схеми гідроксилування поверхні

річкового піску	доменного гранульованого шлаку	відходів збагачення залізних руд
$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \\ \vdots \\ -\text{Si} - \text{O} - \text{Si} - \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \\ \vdots \\ -\text{Si} - \text{O} - \text{Ca} - \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \\ \vdots \\ -\text{Si} - \text{O} - \text{Fe} - \end{array} $

У результаті цього, в даному випадку, навколо поверхні означених заповнювачів накопичується значна кількість молекул води (рис. 1), певна частина з яких дисоціює



що збільшує водоцементне відношення біля зернини заповнювача (рис. 2), тим самим обмежуючи приріст міцності бетону та формуючи контактну зону (рис. 3).

Рушійною силою гідратації цементу у випадку застосування «кислої» води є надлишкова кількість в ній протонів. У даному випадку взаємодія цементу з водою здійснюється на межі розділу фаз, однак не за рахунок вторинних і залежних (розчинних, гідролітичних, хемосорбційних) дій, а шляхом визначальної ролі електростатичних взаємодій, формування в міжфазній зоні перехідного активованого комплексу.

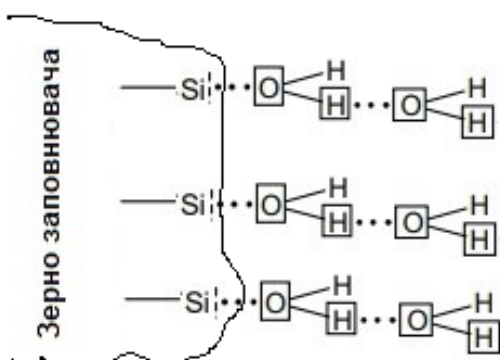


Рис. 1. Схеми адсорбції молекул «лужної» води на поверхні річкового піску

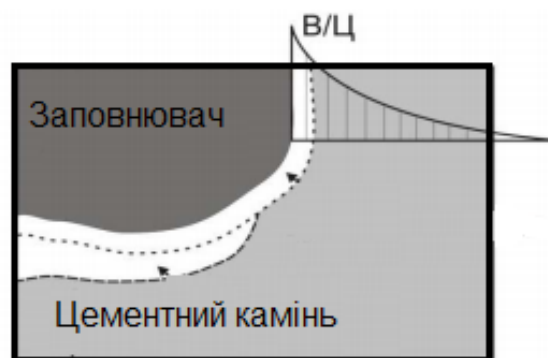


Рис. 2. Зміна В/Ц в контактній зоні [3]

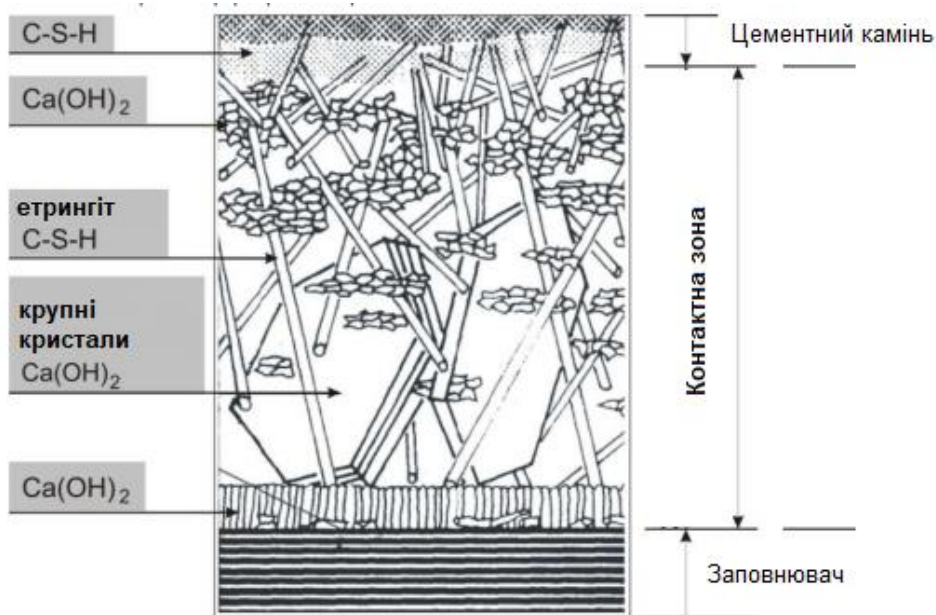
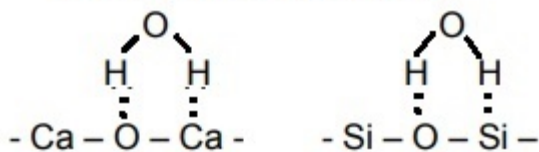


Рис. 3. Структура контактної зони [3]

У даному випадку вода отримує негативний заряд, внаслідок чого відбувається протонування поверхні цементних частинок



та поверхні заповнювачів, яка має негативний заряд (табл. 5).

У результаті цього, в даному випадку, навколо поверхні означених заповнювачів накопичується незначна кількість молекул води (рис. 4).

Підтвердженням розроблених положень є дані незалежних досліджень [16], де зазначається, що створення умов виникнення в контактній зоні низькоосновних

гідросилікатів, які мають високий ступінь дисперсності, а отже, і велику кількість контактів один з одним, дозволяє забезпечити більш однорідну і щільну структуру контактної зони. Для цього потрібно створити умови, в яких у початковий період гідратації підтримується знижене значення рН середовища, як одна з необхідних умов кристалізації низькоосновних гідросилікатів кальцію. Ця умова забезпечується використанням «кислої» води. У результаті на границі розділу фаз забезпечується знижене значення рН середовища, в якому формуються низькоосновні гідросилікати кальцію [16], які, як відомо, відрізняються підвищеною міцністю і стійкістю в агресивних середовищах.

Таблиця 5

Схеми протонування поверхні

річкового піску	доменного гранульованого шлаку	відходів збагачення залізних руд
$ \begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{Si}-\text{O}-\text{Si}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{Si}-\text{O}-\text{Fe}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \end{array} $

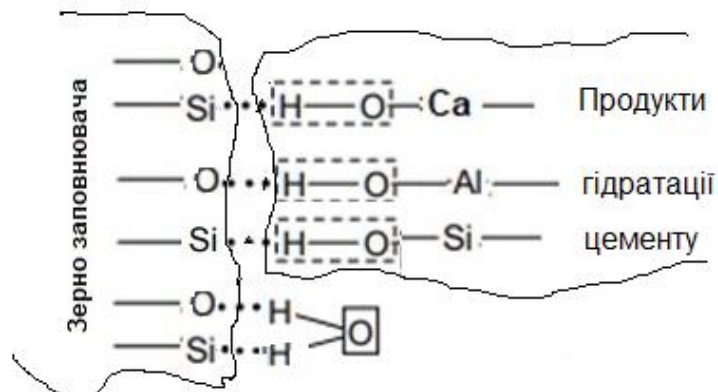


Рис. 4. Схема контактної зони на поверхні річкового піску при застосуванні «кислої» води

Це також підтверджується в роботі Ю. В. Чеховського зі співавторами [17]. Методом мікрозондування та визначення мікротвердості була вивчена контактна зона цементного каменю з основними мінералами заповнювачів бетону (польовим шпатом, кальцитом, кварцом, опалом і халцедоном). Виявлено, що з усіма зазначеними мінералами відбуваються хімічні реакції, що призводять до ослаблення контактної зони цементного каменю. Дослідження контактної зони цементного каменю з заповнювачем показали, що, крім збільшення розміру пір і пористості в контактній зоні цементного каменю і в ділянках, які щільно прилягають до заповнювача, відбуваються хімічні процеси, що додатково змінюють структуру контактної зони.

В цілому узагальнення даних публікацій щодо прямого вимірювання характеристик зчеплення гірських порід з цементним каменем на відрив вказує, що характеристика зчеплення наростає більш

повільно, ніж підвищення міцності цементного каменю на стиск.

Висновки. Результати визначення впливу виду активації води на величину міцності бетону показали, що застосування теорії електрогетерогенних взаємодій при твердінні цементних в'язучих, теорій надмалих концентрацій та міцелярного каталізу дозволили представити теоретичну модель формування контактної зони цементного каменю та заповнювача бетону. Основою процесів, які відбуваються в системі «цемент – активована вода – заповнювач», є протони, що вносяться до системи при активації води наномодифікаторами, які застосовано у надмалих концентраціях. Певна концентрація модифікаторів у воді забезпечує оптимальну кількість в ній протонів, це призводить до збільшення міцності контактної зони між цементним каменем та заповнювачем, що опосередковано відбивається у підвищенні міцності бетону в середньому на 35–40 %.

Список використаних джерел

1. Горчаков Г. И. Строительные материалы. Москва: Высш. школа, 1981. 412 с.
2. Michael A. Caldarone. High-Strength Concrete. A practical guide. New York, 2009. 273 p.
3. Протасевич А. А., Филимонова Н. В. Анализ современных представлений о структуре бетона с позиций его проницаемости. *Вестник БГТУ*. 2011. 1. С. 111-117.
4. Макаева А. А., Помазкин В. А. Про использование магнито-активированной воды для замешивания бетонных смесей. *Бетон и железобетон*. 1998. № 3. С. 26–28.

5. Сафронов В. М., Кугаевский С. А., Румянцева О. В. Цикличная магнитная активация жидких сред смешивания с разрушенной структурой разного химического состава. *Вестник ТГАСУ*. 2012. № 3. С. 133–142.
6. Баженов Ю. М., Фомічов В. Т. Теоретическое обоснование получения бетонов на основе электрохимической и электромагнитно-активированной воды затворения. *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. 2012. Вып. 2 (22). С. 5.
7. Сударев Е. А., Новосёлова А. П. Влияние растворов кислот на процессы гидратации и твердения цемента. Материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием. Менделеев, 2012. Неорганическая химия. Тезисы докладов. Санкт-Петербург: Изд-во «Соло», 2012. С. 314–316.
8. Ковалева А. Ю., Аубакирова И. У., Староверов В. Д. Опыт промышленного применения наномодифицированных бетонных смесей. *Вестник гражданских инженеров*. 2008. № 3(16). С. 74–76.
9. Шишкіна О. О., Шишкін О. О. Дослідження впливу нанокаталізу на формування міцності реакційного порошкового бетону. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2016. 1/6 (79). С. 55–60.
10. Минаков С. В., Рахимбаев Ш. М. Влияние минеральных добавок на эффективность пластификаторов цементных систем. Материалы III Всероссийской конференции молодых ученых. Теория и практика повышения эффективности строительных материалов. Пенза: ПГУАС, 2008. С. 124–127.
11. Березин И. В., Мартинек К., Яцимирский А. К. Физико-химические основы мицеллярного катализа. *Успехи химии*. 1973. Вып. 10. Т. XLU. 1729-1756.
12. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. Ленинград: Химия, 1984. 368 с.
13. Бурлакова Е. Б. Эффект сверхмалых доз. *Вестник Российской Академии Наук*. 1994. Т. 64. С. 425–431.
14. Плагин А. Н. Электрогетерогенный механизм структурообразования цементно-водных систем. Тез. докл. VI Республ. конфер. по физикохимии и технологии получения и применения промывочных жидкостей, дисперсных систем и тампонажных растворов. Киев: ИКХХВ АН УССР, 1985. Ч. I. С. 127.
15. Nanomodified cement composites for thin walled architectural structures To cite this article. Andrii Plugin et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 907 012030.
16. Изотов В. С., Морозова Н. Н. Коррозионная стойкость бетонов на смешанном вяжущем. *Изв. вузов. Строительство*. 1997. 12. С. 50–52.
17. Исследование контактной зоны цементного камня с крупным заполнителем / Ю. В. Чеховский, А. Н. Спицын, Ю. А. Кардаш и др. *Коллоидный журнал*. 1988. № 6. С. 1216–1218.

Шишкіна Олександра Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій Криворізького національного університету. ORCID iD: 0000-0003-3716-9347. E-mail: alexshishkina15@gmail.com.

Шишкін Олександр Олексійович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій Криворізького національного університету. ORCID iD: 0000-0003-3331-1422. Тел.: +38 (067) 569-11-80. E-mail: 5691180@gmail.com.

Alexandra Shyshkina, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Technology of building products, Materials and Structures National University of Kryvyi Rih. E-mail: 5691180@gmail.com. Tel.: + 38-067-569-11-80. ORCID ID:0000-0003-3997-7591.

Alexander Shyshkin, D. Sc. (Tech.), Prof., National University of Kryvyi Rih, E-mail: 5691180@gmail.com. Tel.: + 38-067-569-11-80. ORCID ID: 0000-0003-3331-1422.

Статтю прийнято 24.02.2021 р.

УДК 624.012:69.07

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ДЛЯ БЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДИКИ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ

Канд. техн. наук Я. З. Бліхарський

DETERMINATION OF THE POISSON'S RATIO IN CONCRETE BY USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

PhD (Tech.) Y. Blikharskyu

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241654>

Анотація. У статті наведено результати експериментальних досліджень бетонних призм та визначення коефіцієнта Пуассона, використовуючи методику цифрової кореляції зображення. Для визначення деформацій із застосуванням методики цифрової кореляції зображення використано дві камери Grasshopper 3 фірми Flir. Деформації для кореляції зображень записано зі швидкістю 250 мс. Для освітлення використано дві LED лампи. Оскільки прес не має можливості запису навантаження в часі, то для запису навантаження застосовували камеру зі швидкістю 50 кадр./с. У результаті отримано «напруження-деформації» для бетонної призми в повздовжньому та поперечному напрямках і визначено коефіцієнт Пуассона для бетону класу C50/60.

Ключові слова: коефіцієнт Пуассона, кореляція цифрового зображення, експериментальні випробування, відносні деформації, напруження.

Abstract. The article presents the results of the experimental investigation of concrete prisms and determination of the Poisson's ratio using the method of digital image correlation (DIC). To achieve the goals and objectives of the research, a concrete prism measuring 100x100x400 mm of class C50 / 60 was formed. The surface of the prism was cleaned and levelled to a smooth surface with a mechanical device and grinding stone. The surface of the prism is then cleaned with a solvent to remove dust residues. After that, speckles were applied to determine the strain using the DIC method. For determine the strain, by using digital image correlation, were used Two Flir Grasshopper 3 cameras with a Computar F25 / 2.8 lens and a Sigma 70-200 mm f2.8 APO EX DG HSM Macro II lens. Stains for image correlation were recorded at a speed of 250 ms. 2 LED lamps were used for lighting. Since the press is not able to record the load in time, to record the load used a camera at a speed of 50 frames/sec. The load was applied evenly at the same rate to the physical destruction of the test samples. As a result, the images were processed using VIC-2D software to obtain vertical and transverse strains. The advantage of the image correlation method is the ability to obtain deformations and, accordingly, the stress of the full surface of the sample. Thus, if we analyse the horizontal (transverse) stresses for a prism with a concrete strength of C50 / 60, it is possible to see the appearance of internal cracks in the sample before it occurs outside, at a time when cracks cannot be visually fixed. As a result of work the technique of testing of concrete samples with use of digital correlation of the image is developed and presented. The Poisson's ratio from the beginning of loading to the destruction of the sample was determined experimentally by the developed method.

Keywords: Poisson's ratio, digital image correlation, experimental tests, strain, stress.

Вступ. Визначенням повздовжніх і поперечних деформацій бетону вчені займались з 1970-х років [1]. Зокрема, у праці [2] 1964 року для побудови повної діаграми руйнування бетону використовували спеціально попередньо підготовлені циліндри. Для визначення деформацій бетону застосовували мікроіндикатори та спеціально підготовлену установку. Також в Японії у 2004 році опубліковано результати експериментальних досліджень для визначення деформацій бетону [3]. У даному дослідженні використовували LVDT датчики та спеціально підготовлену установку.

За спільної роботи України та Польщі були випробувані бетони класу C50/60 [4] на двох різних пресах з жорстким режимом навантаження. Першу частину досліджень виконували у Варшаві на спеціально підготовленій установці Instron 8806. Ця машина оснащена високожорсткою рамою, що дає змогу високоточного вирівнювання, та гідравлічними пристроями для контролю подачі навантаження. Прес використовує вдосконалені пристрої для цифрового контролю та датчики навантаження, що дає змогу побудови повної діаграми руйнування бетону. Проте всі ці способи вимагають спеціально підготовлених складних високоякісних дослідних машин для таких випробувань. Із введенням нових нормативних документів в Україні [5–7], які базуються на європейських нормах [8], актуальним питанням є вивчення нових способів визначення деформацій бетону. Особливо це актуально для високоміцних бетонів, оскільки руйнування є раптовим і може спричинити пошкодження закріплених приладів на випробувальних зразках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З розвитком технологій з'явився новий спосіб для контролю деформацій. На сьогодні стає більш популярною методика використання цифрової кореляції зображення (digital image correlation) [9, 10]. Метод цифрової кореляції зображень (DIC) зазвичай використовують при дослідженні

напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, зокрема широко застосовуються в механіці руйнування сталевих конструкцій [11, 12]. Ведуться дослідження для використання цифрової кореляції зображень при дослідженні бетону та залізобетонних конструкцій [13, 14].

Метод цифрової кореляції зображень (DIC) зазвичай використовується при дослідженнях напруженого стану будівельних конструкцій як один з неінтерферометричних методів [15]. Він широко обговорювався в наукових працях [13–15] як методика поєднання теоретичного підходу з параметрами контрольованої точності та експериментальних даних для поглибленого аналізу конструкції. Таким чином, надійну модель поведінки конструктивного елемента можна отримати для подальших чисельних обчислень або практичного використання.

Загалом метод DIC можна охарактеризувати як оптичне вимірювання з цифровою обробкою зображень та чисельними розрахунками [9, 10, 12]. Його широка доступність може пояснюватися великою кількістю спеціального програмного забезпечення, як VIC (Correlated Solutions Company), ARAMIS (GOM Company) та інші, а також простотою його використання. Для цієї методики потрібна цифрова камера з високою якісною цифровою матрицею та особливий рисунок хаотично розміщених чорних точок на досліджуваній поверхні (спектли). Приклад основної схеми методу DIC для циліндричного зразка, випробуваного на розтяг, наведено на рис. 1 у праці [17].

Як було заявлено в праці [17], метод заснований на порівнянні відносних переміщень точок поверхні, зроблених на конкретному етапі, і дозволяє визначити як відносні компоненти деформацій, так і отримати повне поле переміщень та деформацій в зоні вимірювання.

Хоча існує ціла низка очевидних переваг методу цифрової кореляції зображень, все ж існують певні проблеми,

які необхідно враховувати при виборі такого підходу для експериментального дослідження. Таким чином, праці вчених [18–20], які протягом останніх років проводили дослідження, спрямовані на розроблення методу DIC з метою підвищення його точності. Наприклад, дослідження [18] було спрямоване на виявлення найбільш оптимальної техніки перетворення зображень. Було показано, що власний метод демосайсингу на основі бікубічної кривої перевершує інші методи з точки зору точності та приглушення випадкових помилок.

У роботі [19] автори роблять спробу вдосконалити метод, досліджуючи нову комплексну кореляційну функцію як комбінацію чистої кореляційної функції інтенсивності, функції градієнтної кореляції та гессівської кореляційної функції і масштабів, щоб зменшити випадкову помилку вдвічі. За даними [20], рівняння невизначеності в процесі кореляції можуть бути зменшені шляхом введення механізованої регуляризації. В результаті можна отримати значне спрощення та зменшення помилок.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є визначення експериментальним шляхом зміни коефіцієнта Пуассона для бетону залежно від навантаження. Для досягнення мети роботи було поставлено такі завдання:

- розробити методику визначення коефіцієнта Пуассона для бетону з використанням методу цифрової кореляції зображення;

- виконати експериментальні випробування призми і визначити коефіцієнт Пуассона залежно від навантаження.

Основна частина дослідження

Методика експериментальних досліджень. Для досягнення мети та завдань дослідження було сформовано бетонну призму розміром 100x100x400 мм класу C50/60. Поверхню призми очищено та вирівняно до гладкої поверхні за допомогою болгарки та шліфувального каменю. Потім поверхню призми очищено розчинником для видалення залишків пилу. Після цього аерозольним спреєм (рис. 1) наносились спектли для визначення деформацій за допомогою ЦКЗ методу.



Рис. 1. Нанесені спектли на бетонній призмі

Для визначення деформацій з використанням методики цифрової кореляції зображення застосовано дві камери Grasshopper 3 фірми Flir з об'єктивами Computar F25/2.8 та Sigma 70-200 mm f2.8 APO EX DG HSM Macro II. Деформації для кореляції зображень записували зі

швидкістю 250 мс. Для освітлення використано дві LED лампи. Оскільки прес не має можливості запису навантаження в часі, то для запису навантаження додатково застосовано камеру зі швидкістю 50 кадр./с. Загальний вигляд дослідної установки зображено на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд дослідної установки

Навантаження прикладали рівномірно з однаковою швидкістю до фізичного руйнування дослідних зразків.

Результати експериментальних випробувань. В результаті зображення були оброблені за допомогою програмного забезпечення VIC-2D для отримання вертикальних і поперечних деформацій. Перевагою методу кореляції зображення є можливість одержати деформації та відповідно напруження повної поверхні дослідного зразка.

Таким чином, якщо аналізувати горизонтальні (поперечні) напруження для бетонної призми класу С50/60, то можна побачити появу внутрішніх тріщин зразка до її виникнення ззовні, тобто в момент, коли візуально тріщини ще не зафіксуються (рис. 3).

Як наслідок отримано деформації при відповідних напруженнях для бетонної призми в повздовжньому та поперечному

напрямах (табл. 1). Для визначення відносних деформацій, за методикою цифрової кореляції зображення, було встановлено віртуальні екстензометри в програмному комплексі в межах середини зразка та на базі 200 мм.

Коефіцієнт Пуассона визначено як відношення поперечних до повздовжніх деформацій, за ДСТУ Б В.2.7-217:2009.

Експериментальні результати визначення коефіцієнта Пуассона на всіх етапах навантаження подано графічно на рис. 4.

В результаті досліджень встановлено, що коефіцієнт Пуассона для бетону класу С50/60 в діапазоні напружень 0...30 МПа складає 0.25...0.4, в діапазоні 30...40 МПа – 0.4...0.5, а в діапазоні 40...44.8 МПа – 0.5...0.75. Після руйнування на низхідній вітці коефіцієнт Пуассона зростав від 0.75 до 3.0.

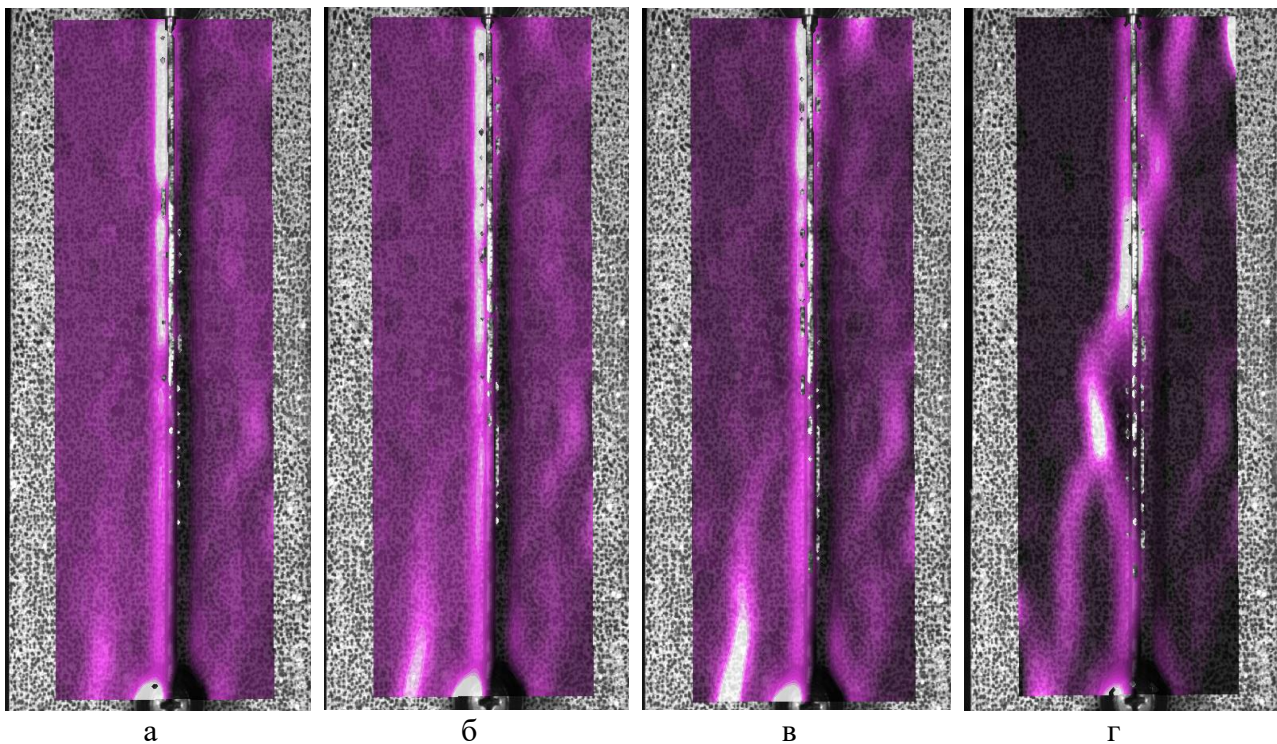


Рис. 3. Характер розподілу поперечних деформацій та появи внутрішніх тріщин: а – при навантаженні 40 МПа; б – при навантаженні 40.5 МПа; в – при навантаженні 41 МПа; г – при навантаженні 42 МПа

Таблиця 1

Напруження-деформації дослідної бетонної призми

Напруження, МПа	Вертикальні деформації, ϵ_1	Поперечні деформації, ϵ_2	Коефіцієнт Пуассона, ν
0	0	0	0
9.375	0.00033	0.000128	0.387379
15	0.000499	0.000188	0.376633
20.5	0.000677	0.00018	0.266284
24.625	0.000811	0.000307	0.378676
30.875	0.000995	0.000418	0.419885
34.125	0.001139	0.000483	0.423959
38	0.001247	0.000607	0.486824
40.5	0.001317	0.00072	0.546663
42.75	0.001487	0.000769	0.517011
44.75	0.001642	0.001184	0.720981
44.875	0.001719	0.001399	0.81416

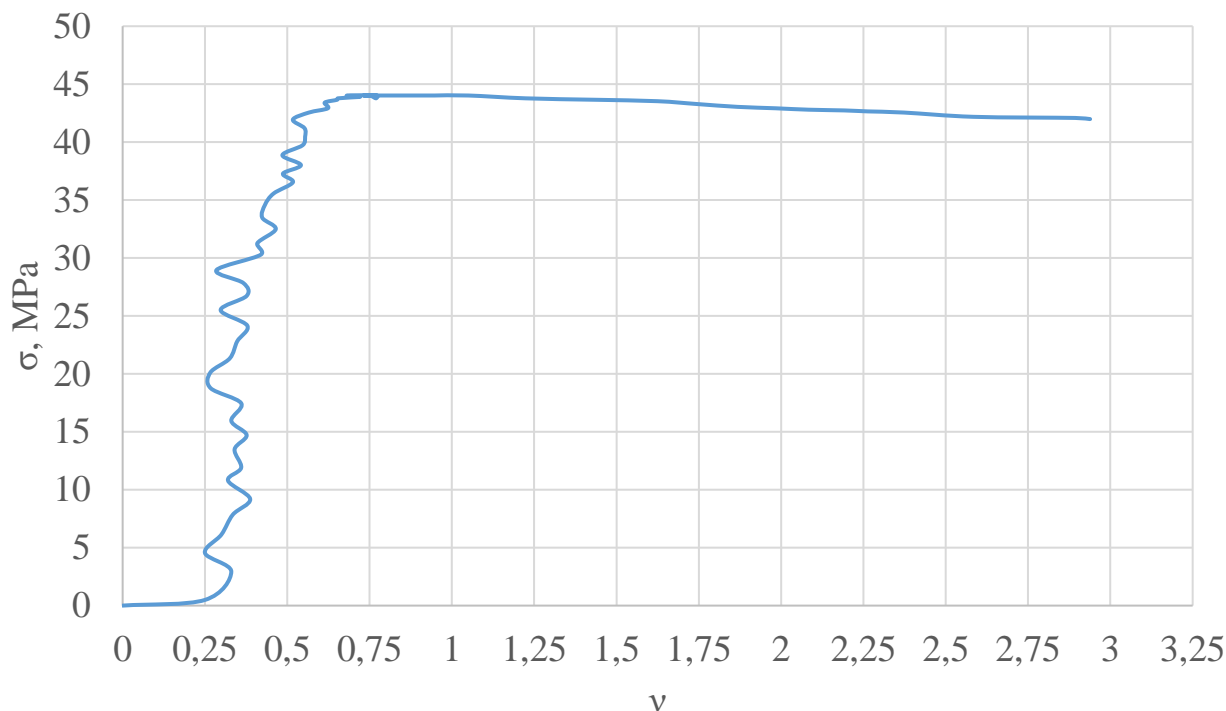


Рис. 4. Графік зміни коефіцієнта Пуассона залежно від навантаження

Висновки. В результаті дослідження розроблено та апробовано методику випробування бетонних зразків з використанням цифрової кореляції

зображення. Експериментальним шляхом за розробленою методикою визначено коефіцієнт Пуассона бетону від початку навантаження до руйнування зразка.

Список використаних джерел

1. Popovics S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*. 1973. № 3(5). P. 583–599. doi:10.1016/0008-8846(73)90096-3.
2. Barnard P. R. Researches into the complete stress-strain curve for concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1964. № 16(49). P. 203–210. doi:10.1680/mac.1964.16.49.203.
3. Watanabe K., Niwa J., Yokota H., Iwanami M. Experimental Study on Stress-Strain Curve of Concrete Considering Localized Failure in Compression. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004. № 2(3). P. 395–407. doi:10.3151/jact.2.395.
4. Дослідження деформативних властивостей бетону класу C50/60 з урахуванням низхідної вітки деформування / М. Дохойда, Є. М. Бабич, С. В. Філіпчук, В. В. Савицький. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2019. № 37. С. 175–183.
5. Babych E. M. Calculation and construction of reinforced concrete beams. NUVGP. 2017. № 2. 191 p.
6. Розрахунок позациентрово стиснутих гнучких залізобетонних елементів за методом реальної кривизни / А. М. Бамбура, О. В. Дорогова, І. Р. Сазонова, В. М. Богдан. *Наука та будівництво*. 2018. № 3. С. 10–20.

7. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
8. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings [Final Draft, Dec. 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.
9. Lavatelli A., Turrisi S., Zappa E. A motion blur compensation algorithm for 2D DIC measurements of deformable bodies. *Measurement Science and Technology*. 2018. № 30(2). 025401. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaf31a>.
10. Zappa E., Hasheminejad N. Digital image correlation technique in dynamic applications on deformable targets. *Experimental Techniques*. 2017. № 41(4). P. 377–387. URL: <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0184-3/>
11. Mai B. V., Pham C. H., Hancock G. J., Nguyen G. D. Block shear strength and behaviour of cold-reduced G450 steel bolted connections using DIC. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. № 157. P. 151–160. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.025>.
12. Tung S. H., Shih M. H., Kuo J. C. Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010. № 48(5). P. 636–641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.09.011>.
13. Fayyad T. M., Lees J. M. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture. *Procedia Materials Science*. 2014. № 3. P. 1585–1590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>.
14. Kozicki J., Tejchman J. Application of DIC technique to concrete-study on objectivity of measured surface displacements. *Experimental Mechanics*. 2013. № 53(9). P. 1545–1559. URL: <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9781-y>.
15. Sutton M. A., Cheng M., Peters W. H., Chao Y. J., McNeill S. R. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*. 1986. № 4(3). P. 143–150.
16. Ústav materialov a mechaniky strojov. Slovenska Akademia. URL: <http://www.umms.sav.sk/6606-sk/deformation-behaviour-of-materials-studied-by-digital-image-correlation-method/> (Accessed on 05.02.2020).
17. Schreier H. W. Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics. *University of South Carolina*. 2003. 348 p.
18. Forsey A., Gungor S. Demosaicing images from colour cameras for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2016. 86. P. 20–28.
19. Sjö Dahl M. Gradient Correlation Functions in Digital Image Correlation. *Applied Sciences*. 2019. № 9(10). P. 21-27.
20. Tomicevic Z., Roux S., Hild F. Mechanics-Aided Digital Image Correlation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design SAGE Publications*. 2013. № 48. P. 330–343.

Бліхарський Ярослав Зіновійович, канд. техн. наук, доцент кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка». ORCID ID: 0000-0002-3374-9195. Тел.: (099) 74-54-550. E-mail: yaroslav.z.blikharskyu@lpnu.ua.

Blikharskyu Yaroslav, PhD CEng, associate prof. of department of highways and bridges, Lviv Polytechnic National University. ORCID ID: 0000-0002-3374-9195. Tel.: (099) 74-54-550. E-mail: yaroslav.z.blikharskyu@lpnu.ua.

Статтю прийнято 10.03.2021 р.

УДК 691.5

ВПЛИВ СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРА MC POWER FLOW 3100 НА ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ДИГІДРАТУ СУЛЬФАТУ КАЛЬЦІЮ

Д-р техн. наук В. М. Дерев'янюк, асп. В. Ю. Мороз,
кандидати техн. наук Л. О. Кушнієрова, Л. В. Мороз, студ. К. П. Косинська

INFLUENCE OF SUPERPLASTICIZERS MC POWER FLOW 3100 ON CALCIUM SULPHATE DIHYDRATE TECHNICAL PARAMETERS

D. Sc. (Tech.) V. Derevianko, postgraduate student V. Moroz, PhD (Tech.) L. Kushnierova,
PhD (Tech) L. Moroz, student K. Kosinska

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241655>

***Анотація.** Досліджено вплив високофункціонального суперпластифікатора MC Power Flow 3100 на фізико-технічні властивості гіпсу. При проведенні досліджень отримано приріст міцності гіпсової в'язучої речовини при стиску 77 % та міцності при згині 17,6 %. Також встановлено, що присутність у тверднучій системі гіпсової в'язучої речовини пластифікуючої добавки не тільки впливає на кінцеві показники водопотреби суміші та міцності утвореного штучного каменю, але й змінює процес тужавлення та кристалоутворення. Виконані дослідження можуть бути підосною для направленою керування структурою матеріалу з метою отримання нових покращених показників властивостей будівельного гіпсу, що в свою чергу дозволить розширити сферу застосування цього матеріалу.*

***Ключові слова:** гіпсова в'язуча речовина, добавка, кристал, властивості, структуроутворення.*

***Abstract.** In recent years, there has been a decrease in gypsum products demand. The improving of gypsum binders properties can help to expand the scope of gypsum binders and, as a result, increase gypsum products demand. The structure of the gypsum binder is the carrier of its properties. Studying the relationship between structure and properties is the way to directed elimination of disadvantages. One of the ways to eliminate the disadvantages is the modification of surfactants and nanoparticles, which affect and allow to control the hydration process. Therefore, the aim of the research is to study the effect of superplasticizer MC Powerflow 3100 on the microstructure, physical and technical properties of calcium dihydrate formed during the hardening of gypsum binder. The increase in the strength of gypsum binder at the compression of 77 percent and the bending strength of 17.6 percent was received during the research. Also the water-gypsum ratio was reduced by 10 percent and the curing time was reduced: beginning from 5 to 2.5 minutes, end from 12 to 8 minutes. It was also found that the presence of the superplasticizer MC Plaflow 3100 in the curing system of gypsum binder changes the process of hardening and crystal formation. It affects on the morphology of gypsum dihydrate crystals. To study the effect of the superplasticizer on the morphology of gypsum dihydrate crystals, the crystals were grown in the presence of superplasticizer MC Powerflow 3100 by the method of counter growth. When superplasticizer MC Powerflow 3100 is added to the solution, the thickening of crystals occurs and also their doubling with the formation of dendritic crystals form. The performed researches can be the basis for the directed management of material structure for the purpose of receiving the new improved indicators of gypsum binders properties that in turn will allow to expand scope of application of this material.*

***Keywords:** gypsum binder, additive, crystal, properties, structure formation.*

Вступ. За даними всеукраїнської спілки виробників будівельних матеріалів України в останні роки спостерігається зниження попиту на вироби з гіпсу (рис. 1).

Покращення властивостей гіпсових в'язучих речовин за рахунок усунення або зменшення їхніх недоліків може сприяти розширенню сфери застосування гіпсових в'язучих речовин і як наслідок збільшити попит на продукцію з них. Носієм властивостей матеріалу є його структура.

Вивчення взаємозв'язку між структурою та властивостями є шляхом для направленої усунення недоліків. Модифікація гіпсової в'язучої речовини, зважаючи на її велику водопотребу, може бути виконана за рахунок регулювання структури різноманітними добавками. В цьому випадку додаткового вивчення потребує питання впливу цих добавок на мікроструктуру продуктів тверднення в'язучої речовини.

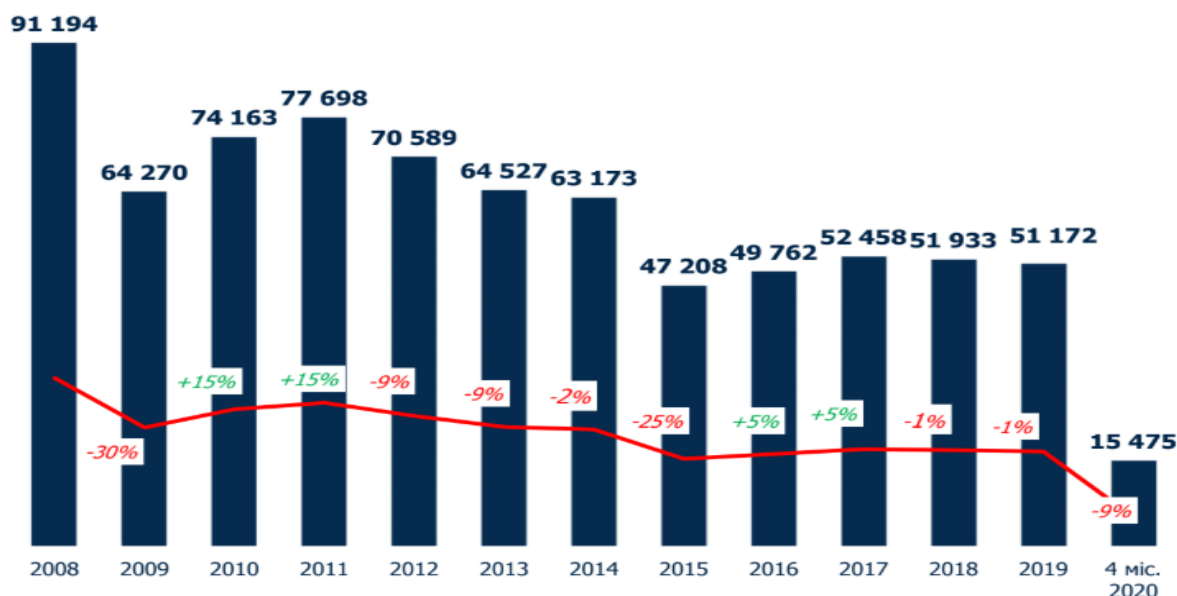


Рис. 1. Виготовлення виробів з гіпсу, тис. м²

Аналіз публікацій. Велика кількість авторів [1-7] вважають, що покращення властивостей гіпсових в'язучих речовин можливе за рахунок направленої регулювання структури та контрольованого росту кристалів внаслідок додавання хімічних добавок та наночастинок з метою формування осередків кристалізації та створення умов направленої передбаченого росту кристалів, прогнозованого на основі зміни енергетичних центрів системи.

Наявність надлишкової води, яка потрапляє до суміші в процесі гідратації та утворює прошарки води між шарами речовини, що твердне, на кристалічному рівні, призводить до формування порової

структури затверділого каменю. Існує думка, що при проникненні молекул води до міжкристалічних порожнин виникають розклинюючі напруження [5]. При цьому велика розчинність гіпсу у поєднанні з такими напруженнями і призводить до зниження міцності та як наслідок малої водостійкості гіпсових в'язучих [5]. Відповідно до роботи [5] з термодинамічної точки зору процес гідратаційного тужавлення та твердіння пов'язаний зі зменшенням енергії Гіббса, тому протікає самовільно. З кінетичної точки зору гідратація – складний фізико-хімічний процес, пов'язаний з адсорбцією води частинками напівгідрату сульфату кальцію,

розчиненням цих частинок, виникненням та ростом центрів кристалізації дигідрату. Кристалічна структура формується по мірі росту кристалів гіпсу та їх переплетінням.

Багато вчених (П. П. Будніков, Л. Й. Дворкін, А. В. Волженський, А. Ф. Полак, В. Б. Ратінов, П. А. Ребіндер, О. О. Пашенко,) у своїх працях приділяли увагу теорії тужавлення і твердіння гіпсових в'язучих [8]. Найбільше вони схиляються до змішаної схеми гідратації гіпсових в'язучих, що поєднує теорію Ле-Шательє (з розчиненням частини речовини у воді та його гідратацією з наступним переходом в осад гідрату) і теорію В. Міхаеліса та А. А. Байкова (з прямим приєднанням води до твердої фази). При цьому пряме приєднання води тим частіше, чим більш реакційноздатніша речовина при взаємодії з водою, чим більша зовнішня та внутрішня поверхні його частинок, чим менше води в суміші з в'язучим і чим вище температура суміші. Такі припущення можна знайти в роботах П. Ф. Ринді, М. А. Сорочкіна, А. Ф. Щурова, В. Кронерта і П. Хауберта.

Також П. П. Будніков, П. А. Ребіндер, Е. Е. Сегалова та інші вважають, що утворення структури тверднучого гіпсового в'язучого можна описати двома етапами. На першому етапі формується каркас кристалізаційний з виникненням контактів зростання, а на другому етапі відбувається обростання існуючого каркаса за рахунок росту його складових. Формування міцності такої системи відбувається за рахунок міцності структури та впливу розтягуючих напружень, що виникають у процесі росту кристалів. Швидкість розчинення в'язучого впливає на ступінь перенасичення розчину у рідкій фазі, що в свою чергу формує кінцеву міцність системи. Зменшення напружень можливе за умови виникнення нових зародків кристалів і контактів між ними, але напруження зростають у процесі росту кристалів.

В. П. Балдін [9] вважає, що наявність різного роду дефектів структури впливає на енергетичну неоднорідність частинок

в'язучого. В цьому випадку кисневі групи є активними центрами з ненасиченими валентними зв'язками. Це додає реакційної здатності матеріалу. Автори роботи [5] зазначають, що термодинамічним аналізом доведено, що на гідрофільній поверхні молекули води адсорбуються локалізовано, відповідно і центри кристалізації дигідрату виникають локально. Перехід напівгідрату в дигідрат відбувається в області капілярної конденсації при відносній вологості більше 80 %.

Гідратація напівгідрату кальцію – це екзотермічна реакція, внаслідок якої виділяється близько 133 кДж на 1 кг в'язучого. При цьому температура суміші, що тужавіє, залежить від якості в'язучого (наявності домішок, умов отримання, тонини помелу тощо). Збільшення температури можна вважати порівняно невеликим, оскільки температура суміші не перевищує 40-50 °С. Кристали дигідрату, що утворюються внаслідок гідратації напівгідрату сульфату кальцію, переплетені один з одним, частково зрощені та створюють первинний кристалізаційний каркас [10].

Автори роботи [11] зазначають, що усунення основного недоліку гіпсової в'язучої речовини – низької водопотреби – також пов'язане зі структурними особливостями гіпсового каменю. Встановлено, що при тужавленні гіпсової в'язучої речовини досягається така енергія зв'язку вологи з матеріалом, яка відповідає коагуляційній структурі гіпсового каменю [12]. В щільних коагуляційних структурах з великою міцністю контакти між частинками точкові. Структури з такими контактами (псевдоконденсаційні за П. А. Ребіндером) найбільше підходять до контактноконденсаційного типу структур з міцними контактами між частинками. Ці структури виникають за умови механічного переплетіння частинок зазвичай подовженої форми, при цьому рідких прошарків між частинками нема [13]. Таким чином, наявність у гіпсовому камені точкових контактів дозволяє пояснити низьку

водостійкість. Сорбція вологи на цих контактах, що відбувається при зволоженні, призводить до зниження вільної поверхневої енергії і як наслідок зменшення міцності. Накопичена в цьому випадку напруга та явища перекристалізації (при великих ступенях зволоження) не дозволяють показникам міцності досягти попереднього значення навіть після висихання матеріалу [14]. Відповідно до вищенаведеного збільшення водостійкості матеріалу можливе або за умови збільшення кількості контактів, або за умови зниження поверхневої енергії точкових контактів, що утворюються. Збільшення кількості контактів можливе за умови додавання до складу ультрадисперсних наповнювачів [15-17], а зменшення поверхневої енергії – за рахунок додавання в систему поверхнево-активних речовин або полімерних добавок.

Мета та завдання досліджень.

Метою досліджень є вивчення впливу добавки MC Powerflow 3100 на мікроструктуру та властивості дигідрату кальцію ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), що утворився при твердненні гіпсової в'язучої речовини. Серед завдань роботи є визначення впливу добавки пластифікатора полікарбонатного типу

на терміни тужавлення та міцність гіпсу, а також вивчення зміни морфології кристалів при твердінні в присутності добавки.

Основний матеріал. Як сировинні матеріали під час проведення досліджень було використано гіпсову в'язучу речовину марки Г5 Н-П відповідно до ДСТУ Б В.2.7-82 виробництва ТОВ «Гіпсовик», м. Камень-Подільський та високофункціональний суперпластифікатор MC Powerflow 3100, що є синтетичною добавкою, яка виготовлена за новітньою технологією полікарбонатів. Особливістю добавки є миттєва дія за рахунок прискореної адсорбції полімеру. Добавка додавалась з водою замішування.

Першочергово було визначено вплив добавки на фізико-механічні властивості гіпсової в'язучої речовини. Під час досліджень застосовувалася стандартна методика визначення властивостей відповідно до ДСТУ Б В.2.7-82.

Встановлено, що додавання добавки MC Powerflow 3100 в кількості 1 % дає змогу знизити показник водо-гіпсового співвідношення на 10 %. Зміну показників термінів тужавлення і міцності подано в табл. 1.

Таблиця 1

Показники міцності і термінів тужавлення гіпсової в'язучої речовини

Вміст добавки	Терміни тужавлення, хв		Міцність при згині, МПа	Міцність при стиску, МПа
	початок	кінець		
0 %	2,5	5	3,07	4,8
1 %	8	12	3,61	8,5

Додавання добавки MC Powerflow 3100 в кількості 1 % дозволяє збільшити міцність гіпсової в'язучої речовини при згині на 17,6 %, а міцність при стиску – на 77 %.

Для вивчення впливу добавки на морфологію кристалів дигідрату гіпсу було проведено вирощування кристалів в присутності добавки MC Powerflow 3100 методом зустрічного росту на основі

розчинів CaCl_2 , Na_2SO_4 . Розчини заливалися у дві ємності, що розташовані одна в одній відповідно до схеми (рис. 2). Методика зустрічного росту передбачає вирощування кристалів з насичених розчинів CaCl_2 , Na_2SO_4 . Добавку вводили в систему разом з насиченим розчином Na_2SO_4 .

Процес росту кристалів у часі наведено на рис. 3.

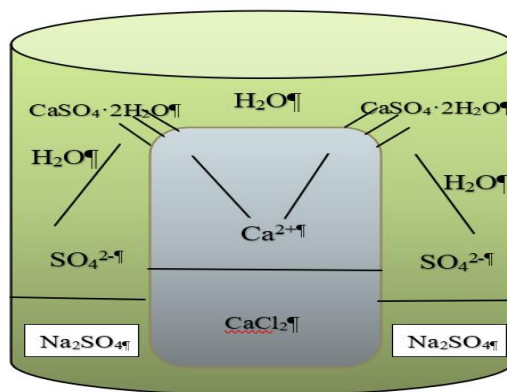


Рис. 2. Схема вирощування кристалів методом зустрічного росту

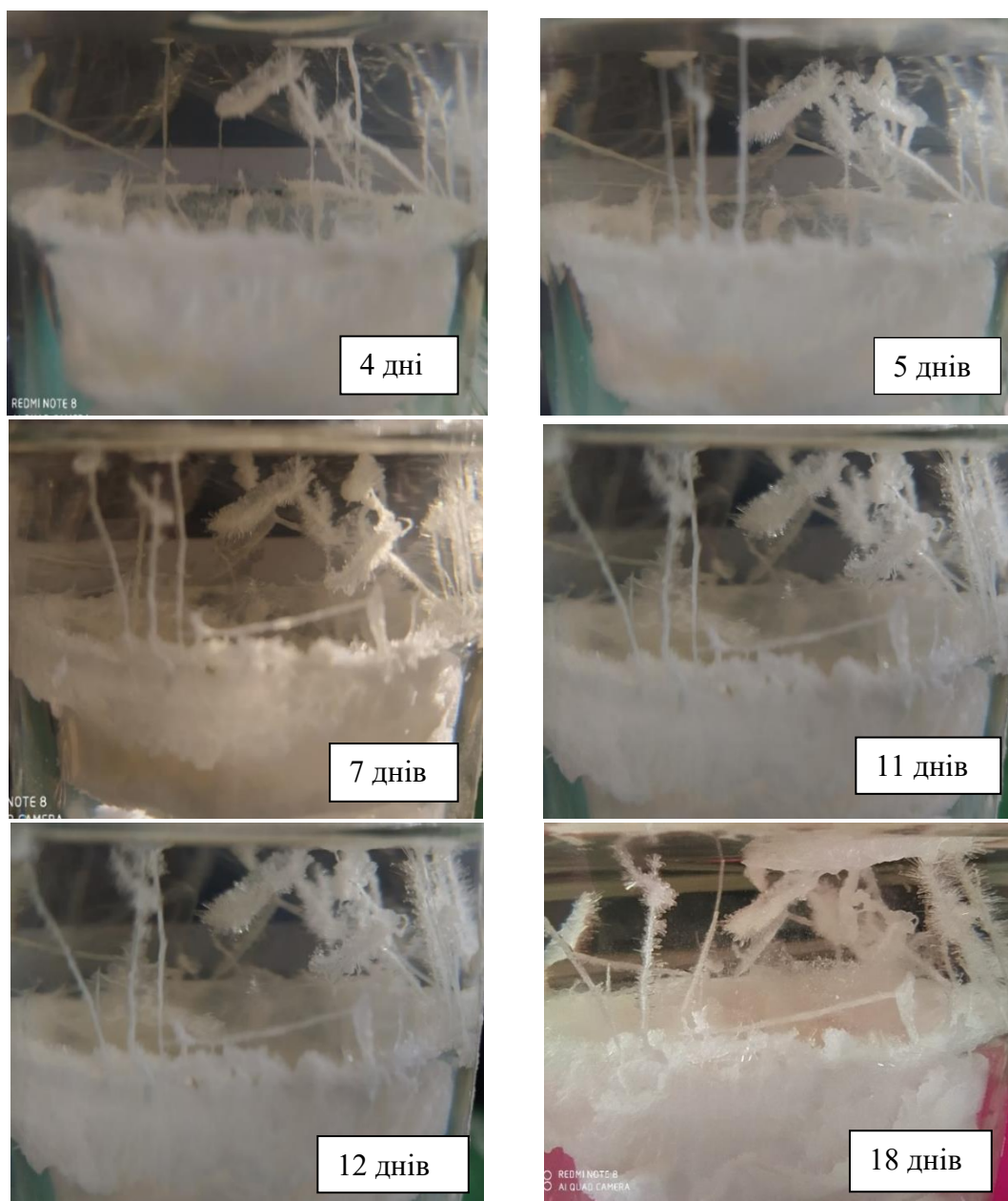


Рис. 3. Процес росту кристалів у натуральну величину

Механізм дії добавки базується на стеричному та електростатичному ефектах [18]. Структурна схема суперпластифікатора у загальному випадку може бути подана відповідно до рис. 4.

Морфологія та обрис кристала визначають швидкість зростання його

граней. Дигідрат гіпсу кристалізується у таблитчастій (рис. 5, а), стовпчастій (рис. 5, б) і призматичній (рис. 5, в) формах з розвинутими (111), (010) і (110) гранями [19-21]. Через розвиток головним чином (010) грані частіше зустрічається таблитчастий обрис (рис. 5, а).

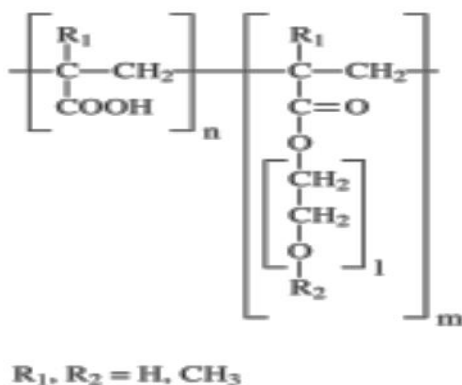


Рис. 4. Принципова структурна схема суперпластифікатора полікарбоксилатного типу

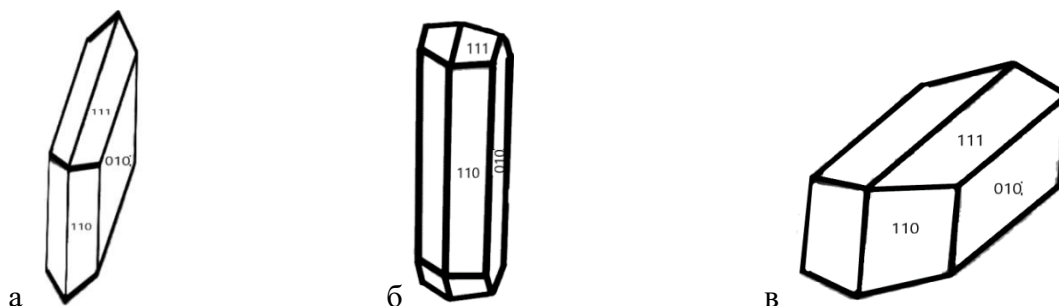


Рис. 5. Морфологічні форми дигідрату гіпсу: а – таблитчата; б – стовпчата; в – призматична

За теоретичними моделями, сторона з найбільшою швидкістю зростання та поверхневою енергією буде мати найменший розмір. Грань (111) має найбільшу поверхневу енергію 1540 ± 160 мДж/м², а (110) і (100) грані – меншу 480 ± 40 мДж/м² та 240 ± 8 мДж/м² відповідно [22]. Це пов'язано з будовою кристалічної решітки CaSO₄·2H₂O [23], яка складається з іонів Ca²⁺ та SO₄²⁻, що повторюються, а також іонно зв'язані в

ланцюги, в яких SO₄²⁻ являє собою тетраедричну структуру, в якій кожен S атом ковалентно пов'язаний з чотирма атомами О (рис. 6). Ця кристалічна структура викликає більш щільне розподілення Ca²⁺ на (111) грані (рис. 7, а) та розподілення SO₄²⁻ на гранях (110) і (100) (рис. 7, б, в). Така структура пояснює те, що CaSO₄·2H₂O має тенденцію рости вздовж осі С [24], а в результаті росту кристали мають витягнутий стовпчастий вигляд (рис. 8, а).

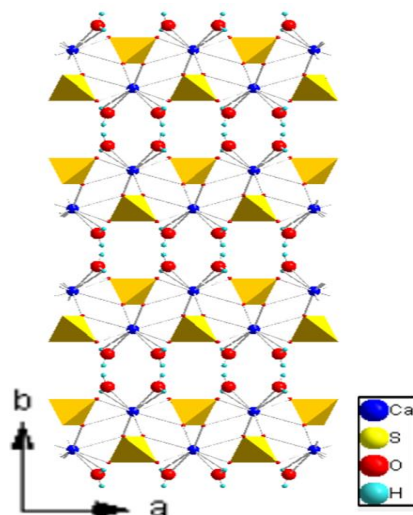


Рис. 6. Кристалічна структура дигідрату гіпсу вздовж осі С

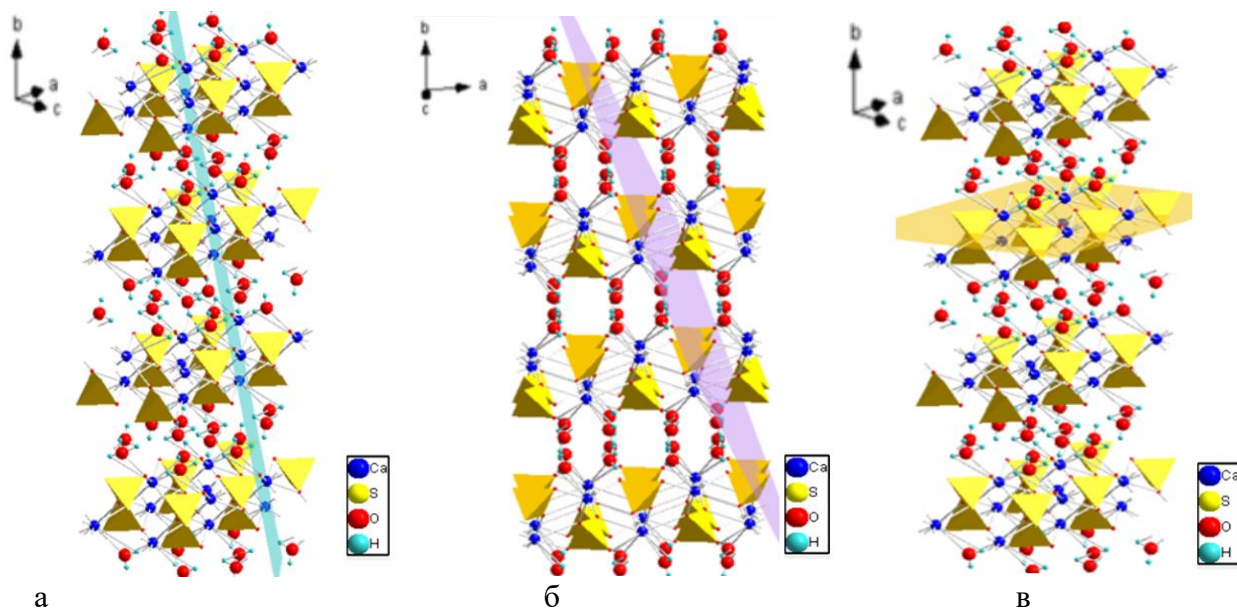


Рис. 7. Розташування кристалографічних граней в кристалічній решітці дигідрату гіпсу:
а – (111); б – (110); в – (010)



а



б

Рис. 8. Вигляд кристала $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: а – без добавки; б – з добавкою

При додаванні в розчин полікарбоксилатної добавки відбувається її адсорбція на верхніх гранях (111) з найбільшою поверхневою енергією (рис. 9). Відбувається процес хелації Ca^{2+} та інгібування росту кристалів вздовж осі С [21]. Це призводить до потовщення кристалів зі збільшенням розміру (100) та (110) граней (рис. 8, б), а також подвоєнню з

утворенням кристалів дендритоподібного обрису (рис. 10) [21]. В результаті цього виникає збільшення кількості контактів на одиницю площі поверхні гіпсового каменю і це явище виконує роль «армуючої» сітки та як наслідок збільшує міцність затверділого каменю і провокує більш ранні терміни тужавлення.

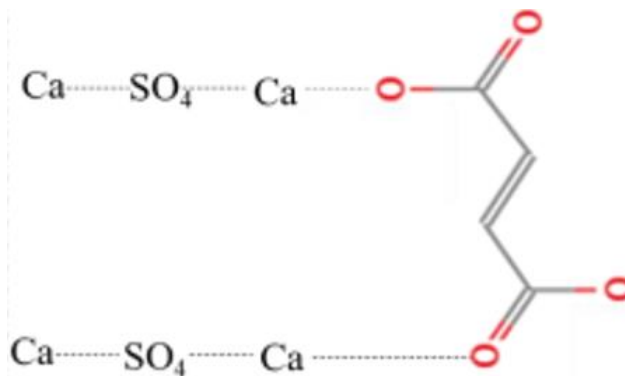


Рис. 9. Утворення комплексів з полікарбоксилатною добавкою на поверхні грані (111)

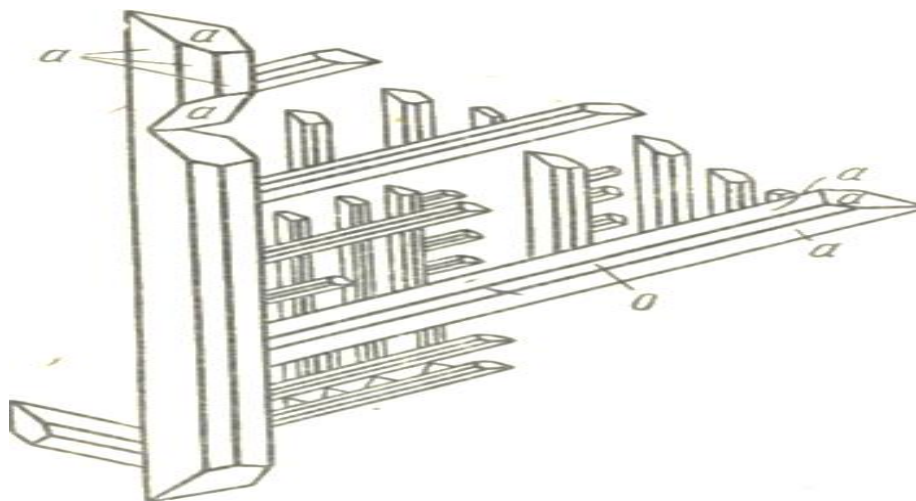


Рис. 10. Дендритоподібна форма кристалу

Висновки. При проведенні досліджень встановлено, що присутність у тверднучій системі гіпсової в'язучої речовини пластифікуючої добавки не тільки впливає на кінцеві показники водопотреби суміші та міцності утвореного штучного каменю, але й змінює процес тужавлення і

кристалоутворення. Виконані дослідження можуть бути підосною для направленою керування структурою матеріалу з метою отримання нових покращених показників властивостей будівельного гіпсу, що в свою чергу дозволить розширити сферу застосування цього матеріалу.

Список використаних джерел

1. Дослідження властивостей модифікованих гіпсових в'язучих / О. Р. Позняк, Н. В. Кондратьєва, В. М. Мельник, Т. В. Мельник. URL: <http://ena.lp.edu.ua>.
2. Деревянко В. Н., Чумак А. Г., Мартыненко Т. В. Изменение структуры и свойств гипсовых вяжущих, модифицированных нанотрубками. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2013. Вип. 26. С. 130–137.
3. Саницький М. А., Солтисік Р. А., Фішер Х.-Б. Вплив модифікаторів на морфологію кристалів та властивості гіпсових в'язучих. URL: <http://ena.lp.edu.ua>.
4. Дребезгова М. Ю., Чернышева Н. В., Шаталова С. В. Композиционные гипсовые вяжущие повышенной водостойкости и морозостойкости. Материалы IX междунар. науч.-практ. конф. «Повышение энергоэффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий». Минск, 2018. С. 80–85.
5. Коровяков В. Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве. *Российский химический журнал*. 2003. Т. XLVII. № 4. С. 18–25.
6. Различия в формировании структуры гипсового вяжущего, модифицированного углеродными нанотрубками и известью / А. Ф. Гордина, Ю. В. Токарев, Г. И. Яковлев, Я. Керене, Э. Спудулис. *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 34–37.
7. Наноструктурные аспекты гидратации и твердения гипсовых и гипсошлаковых композиций на основе двухводного гипса / А. Р. Гаитова, И. И. Ахмадулина, Т. В. Печенкина, А. Н. Пудовкин, И. В. Недосеко. *Строительные материалы*. 2014. янв.-февр. С. 46–51.
8. Полак А. Ф., Бабков В. В., Андреева Е. П. Твердение минеральных вяжущих веществ. Уфа: Башкнигоиздат, 1990. 215 с.
9. Балдин В. П. Современные виды эффективных гипсовых изделий и способы их производства: учеб. пособ. Москва: изд. ВНИИЭСМ, 1990. 142 с.
10. Химическая технология вяжущих материалов / В. Н. Смирнская, С. А. Антипина, С. Н. Соколов. Томск: Изд. ТПУ, 2009. 200 с.
11. Вопросы водостойкости гипсовых материалов / М. С. Гаркави, А. Ф. Бурьянов, Х.-Б. Фишер, Н. А. Колкотаева. Материалы IX междунар. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий». Москва: Изд. «Де Нова», 2018. С. 43–48.
12. Цимерманис Л.-Х. Б. Термодинамика влажностного состояния и твердения строительных материалов. Рига: Зинатне, 1985. 247 с.
13. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. Москва: Стройиздат, 1989. 188 с.
14. Микроструктура гипсового вяжущего повышенной водостойкости / Н. В. Козлов, А. И. Панченко, А. Ф. Бурьянов, В. Г. Соловьев. *Строительные материалы*. 2014. № 5. С. 72–75.
15. Халиуллин М. И., Алтыкис М. Г., Рахимов Р. З. Композиционное ангидритовое вяжущее повышенной водостойкости. *Строительные материалы*. 2000. № 12. С. 34–35.
16. Рахимов Р. З., Халиуллин М. И., Гайфуллин А. Р. Композиционные гипсовые вяжущие с использованием керамзитовой пыли и доменных шлаков. *Строительные материалы*. 2012. № 7. С. 13–16.
17. Полак А. Ф., Бабков В. В., Андреева Е. П. Твердение минеральных вяжущих веществ. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1990. 216 с.
18. Юхневский П. И. О механизме пластификации цементных композиций добавками. *Строительная наука и техника*. 2010. № 1–2. С. 64–69.
19. Heijnen W. M., Hartman P. Structural morphology of gypsum, brushite and pharmacolite. *Journal of Crystal Growth*. 1991. 108. P. 290–300.

20. Voort E. V., Hartman P. The habit of gypsum and solvent interaction. *Journal of Crystal Growth*. 1991. 112. P. 445–450.
 21. Черкасова Т. Ю. Основы кристаллографии и минералогии. Москва, 2014. 207 с.
 22. Устинова Ю. В. Влияние полимерных добавок на кристаллизацию двуводного сульфата кальция. *Строительство: наука и образование*. 2013. № 2. URL: <http://www.nso-journal.ru>.
 23. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. Москва: КДУ, 2007. 721 с.
 24. Synthesis of α -CaSO₄ · 0.5H₂O from flue gas desulfurization gypsum regulated by C₄H₄O₄Na₂6H₂O and NaCl in glycerol-water solution / Qing-Jun Guan, Wei Sun, Yue-Hua Hu, Zhi-Gang Yin and Chang-Ping Guan. *RSC Adv*. 2017. 7. P. 27808–27815.
 25. American Mineralogist Crystal Structure Database. URL: <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>.
-

Дерев'яно Віктор Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. ORCID ID 0000-0002-2537-4389. E-mail: viktorderevianko2017@gmail.com.

Мороз Володимир Юрійович, аспірант кафедри технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. ORCID ID 0000-0003-2435-8050. E-mail: morozdnipro@ukr.net.

Кушнерова Лілія Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів Київського національного університету будівництва та архітектури. ORCID ID: 0000-0003-0759-8050. Тел.: +38 (093) 375-17-22. E-mail: kushnierova.lo@knuba.edu.ua.

Мороз Ліна Вікторівна, канд. техн. наук, доцент кафедри цивільної інженерії, технології будівництва і захисту довкілля Дніпровського державного аграрно-економічного університету. ORCID ID 0000-0003-3150-7472. Тел. +38 (067) 951-69-30. E-mail: linysek83@gmail.com.

Косинська Катерина Петрівна, студентка Дніпровського державного аграрно-економічного університету за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». E-mail: ekaterinakosinska2204@gmail.com.

Derevianko Viktor, D. Sc. (Tech.), Prof. department of Technology of building materials, products and structures Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. ORCID ID 0000-0002-2537-4389. E-mail: viktorderevianko2017@gmail.com.

Moroz Volodimir, postgraduate student, department of Technology of building materials, products and structures Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. ORCID ID 0000-0003-2435-8050. E-mail: morozdnipro@ukr.net.

Kushnierova Liliya, PhD (Tech). Associate Professor, department of Building Materials, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID ID: 0000-0003-0759-8050. Тел.: +38 (093) 375-17-22. E-mail: kushnierova.lo@knuba.edu.ua.

Moroz Lina, Ph.D., Associate Professor, department of Civil Engineering, Construction Technology and Environmental Protection Dnipro State Agrarian-Economic University. ORCID ID 0000-0003-3150-7472. Тел. +38 (067) 951-69-30. E-mail: linysek83@gmail.com.

Kosinska Katerina, student of Dnipro State Agrarian-Economic University for specialty 192 «Construction and Civil Engineering». E-mail: ekaterinakosinska2204@gmail.com.

Статтю прийнято 23.03.2021 р.

УДК 625.1:691.328

**ВПЛИВ КОРОЗІЇ БЕТОНУ ВІД ВЗАЄМОДІЇ ЛУГІВ ЦЕМЕНТУ З
РЕАКЦІЙНОЗДАТНИМИ ЗАПОВНЮВАЧАМИ НА ПОШКОДЖЕННЯ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ У КОЛІЇ**

Д-р техн. наук А. А. Плугін, аспіранти О. П. Крикун, В. В. Зінченко,
кандидати техн. наук О. С. Борзяк, О. А. Дудін

**INFLUENCE OF CONCRETE CORROSION FROM THE INTERACTION OF ALKALIS
OF CEMENT WITH REACTIVE AGGREGATES ON DAMAGE TO REINFORCED
CONCRETE SLEEPERS IN A TRACK**

D. Sc. (Tech.) A. Plugin, postgraduate students O. Krykun, V. Zinchenko,
PhD (Tech.) O. Borziak, PhD (Tech.) O. Dudin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241657>

***Анотація.** У статті наведено аналіз причин утворення тріщин та інших пошкоджень у залізобетонних шпалах, встановлено вплив корозії на пошкодження бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, виявлено вагомості кожної з причин. Корозія бетону шпал, обумовлена реакцією між лугами та кремнієвою кислотою – лужно-кремнеземистою реакцією, в Україні спричинена безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу та модернізацією виробництва цементних заводів, яка призвела до підвищення вмісту лугів понад 0,6 %. З усіх конструкцій з бетону корозія від лужно-кремнеземистої реакції найшвидше протікає саме у підрейкових основах залізниць – її ознаки з'являються в середньому через 2,8 року експлуатації, та фундаментах опор контактної мережі – через 3 роки. Це обумовлено особливостями конструкції та умов експлуатації шпал, у т. ч., можливо, додатковим до обводненості впливом струмів витоку. Внаслідок лужно-кремнеземистої реакції в бетоні виникають розтягувальні напруження, які призводять до утворення просторової сітки мікротріщин і зниження міцності бетону на розтяг.*

***Ключові слова:** залізобетонна шпала, тріщиностійкість, лужна корозія, лужно-кремнеземиста реакція.*

***Abstract.** The article analyses the causes of cracks and other damage in reinforced concrete sleepers. The effect of concrete corrosion, which is caused by the interaction of cement alkalis with reactive aggregates, on damage to sleepers has been established. The significance of each of the reasons has been established. Corrosion of concrete sleepers, which is caused by the reaction between alkalis and silicic acid - Alkali-Silica Reaction (ASR), in Ukraine was initially caused by a haphazard change in suppliers of aggregates and cement. Also it influenced by the modernization of the production of cement plants, which led to an increase in the content of alkalis in cement by more than 0.6%. Of all concrete structures, corrosion from ASR proceeds faster precisely in the railway track structures - its signs appear on average after 2.8 years of operation, and the foundations of overhead catenaries - after 3 years. For other structures, these signs appear later - for bridge structures after 3.7 years, for road surfaces - after 6.9 years. This is due to the peculiarities of the design and operating conditions of the sleepers, including, possibly, the effect of leakage currents additional to the water cut. The corrosion rate from ASR in structures in Ukraine is much higher (signs of corrosion appear on average after 2.2 years) than in the countries of North America, Central*

and Northern Europe (6.1 and 6.4 years, respectively). This is due to the wider use of additives in concrete, a better regulatory framework and a culture of compliance in these countries. ASR directly causes 15.5 % of defects, contributes to the formation and development of 32.8% of defects to the greatest extent, does not affect 30.9 % of defects at all, and to a limited extent contributes to the emergence and development of other 20.8 % of defects. The effect of corrosion of concrete from ASR on the occurrence of damage (defects) in sleepers is explained by the fact that as a result of ASR tensile stresses arise in concrete, which lead to the formation of a spatial network of microcracks and a decrease in the tensile strength of concrete. Since the prestressing of the reinforcement has created tensile stresses in the transverse direction, predominantly longitudinal cracks occur in the sleepers. Prestressed reinforced concrete structures are more vulnerable to damage caused by ASR concrete corrosion than conventional reinforced concrete or concrete structures.

Keywords: reinforced concrete sleeper, crack resistance, alkaline corrosion, Alkali-Silica Reaction.

Вступ. На залізницях України експлуатується переважно безстикова колія на залізобетонних шпалах. Шпали виготовляються згідно з ДСТУ Б В.2.6-209 [1] попередньо напруженими з бетону класу С32/40 переважно двох типів – Ш1 і СБ3. Вони запроєктовані на відповідність навантаженням, встановленим ДСТУ 7571 [2], а для їх бетону нормуються відповідні суворим умовам експлуатації марки з морозостійкості F200 та водонепроникності W6. Конструкція і технологія залізобетонних попередньо напружених армованих високоміцним дротом шпал типу Ш1 під роздільні клемно-болтові проміжні рейкові скріплення КБ була впроваджена в 1960-х рр. [3, 4]. Технологічні лінії з виготовлення шпал у довгих 10-місних (2×5) формах тоді надійшли з Угорщини. Починаючи з 1990-х рр., на залізницях України впроваджуються також шпали типу СБ3, призначені для нероздільних пружних анкерних рейкових скріплень КПП-5, розроблених на основі польських скріплень СБ-3 та привабливих своїми малодетальністю, низькими метало- та трудомісткістю утримання. Шпали типу СБ3 відрізняються від Ш1 наявністю замуrowаних у бетон анкерів замість отворів із закладними шайбами для закладних болтів і більшою висотою підрейкового перерізу.

Шпали, що постачаються на залізниці, витримують вихідний контроль, передбачений ДСТУ Б В.2.6-209 [1] та його попередніми редакціями, у т. ч. ГОСТ 10629. Незважаючи на це по мірі напруцювання, що оцінюється пропущеним тоннажем, у шпалах утворюються тріщини та інші пошкодження (дефекти), які майже всі враховані технічними вказівками ЦП-0150 [5]. Проте, починаючи з 2000-х рр., відмічаються й нові види пошкоджень, наприклад сітка тріщин, яка, як правило, виникає через 1–3 роки експлуатації [6], у подальшому розвивається у більші тріщини та призводить до руйнування і вилучення з колії сотень шпал набагато раніше за встановлене напруцювання (рис. 1).

Наявність аналогічної сітки тріщин та її розвиток у більші тріщини спостерігався також у залізобетонних плитах безбаластного мостового полотна (рис. 2, а). Відомі також випадки аналогічних тріщин у залізобетонних мостових прогонових будовах, наприклад балках прогонової будови довжиною 11,4 м, встановлення якої у 2017 р. було скасовано внаслідок виявлення в ній тріщин після річного зберігання на складі мостобудівного поїзда № 8 Південної залізниці (рис. 2, б). Характерними для плит БМП і прогонових будов були патьоки вилуговування через сітку тріщин (рис. 2).



Рис. 1. Пошкодження залізобетонних шпал, що розвинулись із сітки тріщин:
а – відколи бетону; *б* – повністю зруйновані шпали, вилучені з колії на ст. Бахмач Південно-Західної залізниці



Рис. 2. Сітка тріщин у залізобетонних конструкціях:
а – безбаластного мостового полотна; *б* – прогонової будови

Встановленню причин тріщиноутворення була присвячена низка науково-дослідних робіт (НДР), зокрема «Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону» (ДНУЗТ, 2011), «Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал Ш1-3 виробництва ПрАТ «Коростенський завод ЗБШ» (ДНУЗТ,

2015), «Провести фізико-хімічні дослідження бетону залізобетонних шпал та надати висновок щодо причин його корозії» (НДІБК, 2019). У даних роботах утворення цієї сітки тріщин у шпалах пов'язується з корозією бетону від взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, зокрема активним кремнеземом, який в них міститься [7–11]. Проте у наведених роботах недостатньо уваги приділено дослідженню

впливу зазначених корозії та сітки тріщин на утворення і розвиток інших різних дефектів (пошкоджень) у шпалах [5]. Отже, дослідження, спрямовані на встановлення та усунення причин утворення тріщин у шпалах, встановлення впливу корозії бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, на пошкодження шпал, є актуальним завданням, вирішення якого дозволить знизити втрати від передчасного виходу з ладу та заміни шпал раніше за встановлене напрацювання.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – уточнення причин утворення тріщин та інших пошкоджень у залізобетонних шпалах, встановлення впливу корозії на пошкодження бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами, виявлення вагомості кожної з причин.

Для досягнення поставленої мети сформовані завдання досліджень:

- аналітичний огляд наявних даних у літературних джерелах і результатів попередніх досліджень щодо причин тріщиноутворення залізобетонних конструкцій, у т. ч. корозії бетону, обумовленої взаємодією лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами;
- аналіз результатів натурних обстежень і виявлення причин тріщиноутворення залізобетонних конструкцій;
- порівняльний і статистичний аналіз літературних джерел, результатів попередніх досліджень і натурних обстежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У багатьох країнах Європи, Північної Америки, Південної Африки, Австралії проблема корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами є надто актуальною та широко відома з 1940-50-х рр. [8–10]. Перші згадки про реакційну здатність природних кам'яних матеріалів у лужних середовищах відносяться до 1916 р., коли було повідомлено про реакцію між

польовим шпатом і карбонатом натрію. Деградацію бетону внаслідок реакції між лугами, що містились у цементі, та деякими природними заповнювачами було зафіксовано у 1922 р. у гідротехнічній споруді New River Hydropower Station (Вірджинія, США) через 10 років після її зведення [12]. У 1940 р. Т. Stanton спростував стале уявлення про те, що заповнювачі в бетоні є дійсно інертними і не вступають у жодні хімічні реакції [12]. Він виявив негативний вплив лугів цементу на заповнювачі. Його ранні експериментальні роботи показували, що розширення і розтріскування бетону було результатом поєднання високолужного цементу і реакційноздатного заповнювача та зберігання зразків бетону за високої вологості. За результатами його робіт були зроблені два важливих висновки: 1) розширення зразків у результаті реакції між лугами цементу і кремнеземом заповнювача є незначним, коли вміст лугів у цементі не перевищує 0,6 % у перерахунку на Na_2O ; 2) часткове заміщення високолужного цементу активними пуцолановими добавками запобігає надмірному розширенню бетону. У період 1947–52 рр. у Німеччині та США було показано, що ці процеси обумовлені реакцією між лугами та кремнієвою кислотою – лужно-кремнеземистою реакцією, Alkali-Silica Reaction (ASR) [13, 14]. Але ці дослідження лише описували наявність проблеми, не пропонуючи її вирішення.

На початку 1950-х рр. руйнівну дію цієї реакції на бетон було виявлено в Австралії, а з середини 1950-х рр. руйнування конструкцій фіксувалися вже в багатьох країнах світу: Канаді й Данії (1950), Ісландії (1960–1970), СРСР (1962), Південній Африці (1970), Великій Британії (1971), Туреччині (1975), Швеції і Норвегії (1980–1990), Швейцарії (1995), Нідерландах (1995–1998), Фінляндії (2011) [15–27]. Корозії зазнавали конструкції автодорожніх та аеродромних покриттів, мостів, гребель, водопропускних споруд, підрейкових кон-

струкцій залізниць, будівель. У Данії руйнування бетону, обумовлене цією причиною, прийняло настільки масовий характер, що було створено Національний комітет з проблеми лугостійкості бетону [15].

У Німеччині, як відмічав Й. Штарк [9], приблизно до 1965 р. існувала думка, що внаслідок геологічної ситуації реакція з лугами, що спричиняє пошкодження бетонних елементів, не відбувається. Проте Лахсверський міст (Шлезвіг-Гольштейн), збудований у 1965–66 рр. і в якому зафіксовано пошкодження внаслідок ASR, вже у 1968 р. через небезпеку експлуатації

було знесено. На території Східної Німеччини перші пошкодження від ASR були виявлені у 1979–80 рр. у Мекленбурзі та у 1983 р. у Саксонії і Тюрингії. Пошкодження шпал із попередньо напруженого залізобетону внаслідок ASR на залізницях Німеччини призвели до мільярдних витрат. На момент видання роботи [9] її авторам продовжувала поступати інформація про нові пошкодження конструкцій, переважно мостів, від ASR. Можна вважати досі не вирішеними ці проблеми стосовно мостів й у Швеції (рис. 3).



а



б



в

Рис. 3. Велосипедно-пішохідний міст Kartensbron у м. Мальме, Швеція, збудований у 2013 р.: *а, б* – вигляд мосту; *в* – сітка тріщин від лужної корозії на бетонному покритті тротуарів, у 2019 р.

Для запобігання ASR у 1974 році було розроблено «Запобіжні заходи проти ушкоджень лужною реакцією в бетоні», яке

неодноразово переглядалось – за станом на 2007 р. було чинним вже 5 видання [10]. Основним заходом було передбачено обме-

ження вмісту лугу в клінкерних цементах не більше 0,6 % у Na_2O -еквіваленті. Пізніше в Німеччині обмеження були пом'якшені до 0,8 % у портландцементі та 1,0 % у портландцементі зі шлаком. Проте обмеження 0,6 % є базовим для розроблення в різних країнах нормативів на цемент, бетони, залізобетон. Так, воно тривалий час не дає можливості обґрунтувати застосування нового класу швидкотверднучих лужно-активованих цементів [28–30], у складі яких лугів значно більше (1,5–5 %), ніж у традиційних цементах.

У СРСР проблема пошкодження залізобетонних шпал від ASR мала більш академічний, ніж виробничо-експлуатаційний характер [8]. Заводи залізобетонних конструкцій, у т. ч. шпал, були прив'язані до постійних визначених ще на стадії їх будівництва кар'єрів заповнювачів і виробників цементу, а цемент був менш активним і з набагато меншим вмістом лугу.

Корозія бетону шпал від ASR в Україні проявила себе лише з середини 2000-х рр. За даними НДР «Исследования основных производственных факторов, определяющих расходы цемента при изготовлении железобетонных конструкций» (ХарДАЗТ, 1998), збільшення корозійних пошкоджень спричинено постійною безсистемною зміною постачальників заповнювачів і цементу, яка почалася у 1990-ті рр. У таких умовах виникла необхідність у розробленні рекомендаційних документів для заводів залізобетонних шпал [31, 32]. Суттєво вплинула також модернізація виробництва цементними заводами з середини 2000-х рр., яка полягала, по-перше, у переведенні випалу клінкеру з газу, що дорожчав, на вугілля, по-друге, в уловлюванні з повітря та повертанні у сировину пиловатих фракцій клінкеру [33]. Поряд з підвищенням тонини помелу це призвело до підвищення активності цементу, що дозволило заводам ЗБШ навіть відмовитись від тепловологісної обробки шпал влітку, і різкого та спочатку практично неконтрольованого підвищення

вмісту лугів, про що свідчать дані НДР «Проведення досліджень з використання хімічних добавок для зниження енергоємності виробництва залізобетонних шпал і розробка ДСТУ на шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 мм» (УкрДУЗТ, 2013-2014).

У 2015–19 рр. в УкрДУЗТ у межах НДР «Проведення досліджень з можливості застосування шпал залізобетонних попередньо напружених колії 1520 мм типу СБЗ зі скріпленнями проміжними пружними типу КПП-5 на ділянках підвищеної вантажонапруженості та розробка рекомендацій» (2015-2016), «Оцінка впливу класу бетону за міцністю на стиск попередньо напружених залізобетонних шпал типу СБЗ-0 на їх працездатність і ресурс» (2019), «Дослідження впливу конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів на утворення тріщин у шпалах типу СБЗ» (2019) було проведено натурні й лабораторні дослідження з виявлення впливу різних факторів на пошкоджуваність шпал [34–36]. Було встановлено вплив конструкції вузла скріплення, класу бетону, положення арматурного пакета (відхилення товщини захисного шару) на утворення у шпалах тріщин певних видів, а також відсутність впливу вантажонапруженості ділянки (на накопичення пошкоджень впливає тільки напруження). Разом з цим отримано дані щодо кількості шпал з ознаками корозії від ASR, які й проаналізовано у цьому дослідженні.

Основна частина дослідження. Аналіз робіт [15–27] показав, що найчастіше руйнувань зазнають такі конструкції з бетону, як мости, автодорожні покриття, фундаменти опор контактної мережі, підрейкові конструкції, рідше – конструкції будівель. У табл. 1 і на рис. 4 узагальнено дані [10, 21, 23, 34] та дані НДР УкрДУЗТ 2015-2019 рр. щодо тривалості експлуатації конструкцій до виявлення пошкоджень від корозії внаслідок ASR.

Аналіз табл. 1 і рис. 4 показує, що для конструкцій різного призначення, які зазнають корозії від ASR, характерні різні терміни експлуатації до виявлення пошкоджень від неї – найшвидше ознаки корозії з’являються саме у підрейкових основ залізниць (в середньому через 2,8 року, рис. 4, б), потім у фундаментах опор контактної мережі (3 роки), мостових конструкцій (3,7 року), автодорожніх покриттів (6,9 року). Це свідчить про вплив на швидкість цього виду корозії умов

експлуатації та особливостей конструкції, у т. ч. виду і витрати цементу в бетоні, а також про те, що саме для умов експлуатації та особливостей конструкції залізничних шпал ця корозія протікає найшвидше. Також такий розподіл швидкості корозії між конструкціями може свідчити про додатковий до обводненості вплив на неї струмів витоку, який найчастіше спостерігається саме у підрейкових основах і фундаментах опор контактної мережі та не спостерігається в автодорожніх покриттях.

Таблиця 1

Тривалість експлуатації конструкцій з бетону до виявлення пошкоджень від корозії внаслідок ASR

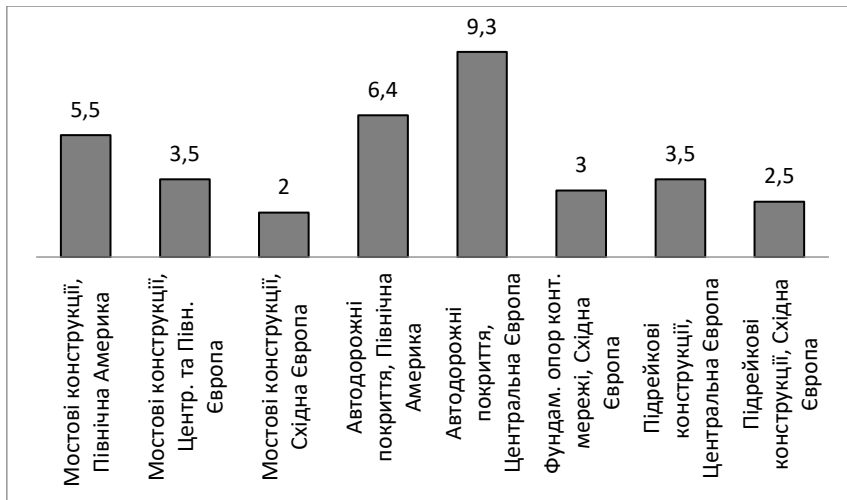
Вид конструкцій	Джерело	Країна, регіон		Рік		Т, років		
				будівництва	виявлення пошкоджень			
Мостові конструкції	[21]	США	Вашингтон	1919–20	1923	3	4,5	
			Арканзас	1934	1942	8		
	[10]	Німеччина	Шлезвіг-Гольштейн	1965–66	1968	2		
	Рис. 3 Рис. 2	Швеція Україна	Мальме Харків	2013 –	2018 –	5 1–3		
Автодорожні покриття	[21]	США	Каліфорнія	1927	1932	5	7,7	
				Вашингтон	1930–31	1939		8–9
				Небраска	1931	1932		1
	[10]	Німеччина	Раштадт	1985	1996	11		
			Дормштадт-Франкфурт	1993	2004	11		
		Пригувалк-Пархім	1994–96	2002	8			
		Менхофдрайек-Франкфурт	1997	2004	7			
Фундаменти опор контактної мережі	[23]	СРСР, РФ		–	–	3	3	
Підрейкові конструкції	[10]	Німеччина		–	–	2–5	3,5	
	[23]	РФ		2001	2004	3		
	[34]	Україна	Харківська обл.	2005–07	2006–08	1–3		

Також відмічено різну швидкість корозії від ASR для конструкцій, що зведені та експлуатуються в різних частинах світу

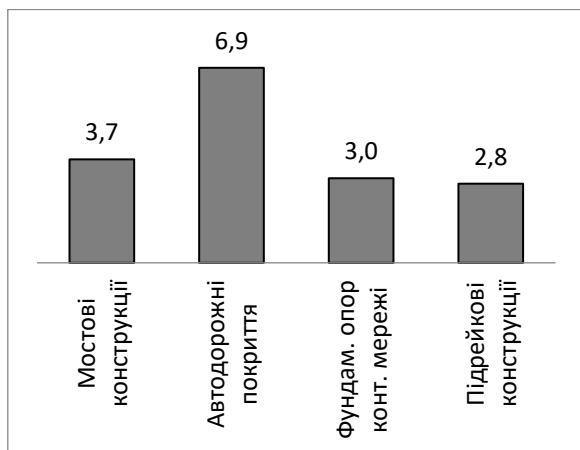
(рис. 4, в). Найшвидше ознаки корозії з’являються у країнах Східної Європи (Україна, РФ, в середньому через 2,2 року),

а в країнах Північної Америки, Центральної та Північної Європи – набагато повільніше (6,1 і 6,4 року, відповідно). Оскільки кліматичні умови у цих країнах приблизно схожі, це, очевидно, пов'язано з технічним

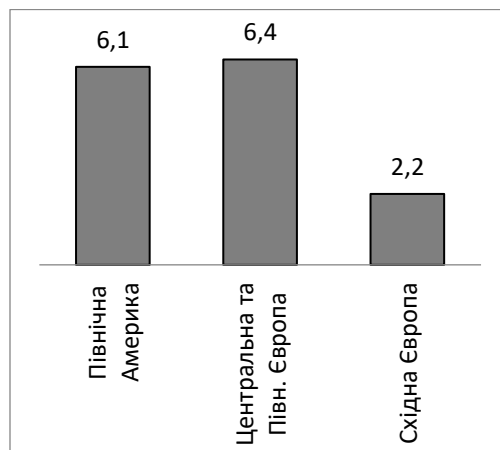
рівнем будівельної галузі в них – більш раннім і широким застосуванням добавок в бетони, більш досконалою нормативною базою та культурою її дотримання.



a



b



v

Рис. 4. Тривалість експлуатації до виявлення пошкоджень від корозії внаслідок ASR конструкцій з бетону: a – різного призначення, експлуатованих у різних частинах світу; б – різного призначення; в – експлуатованих у різних частинах світу

Аналіз даних НДР УкрДУЗТ дозволив удосконалити встановлену у вказівках [5] та розвинуту у роботі [36] класифікацію пошкоджень (дефектів) залізобетонних шпал, уточнити причини їх утворення. Удосконалена класифікація дефектів та причини їх утворення наведені на рис. 4 і в табл. 2.

На основі даних НДР УкрДУЗТ 2015-2019 рр. за результатами численних натурних досліджень ділянок залізниць з найбільшою пошкоджуваністю шпал визначено частку шпал з кожним дефектом, складено рейтинг дефектів за розповсюдженістю, наведений у табл. 3.

11.1/11.2 Поперчні тріщини в підрейковому перерізі знизу шпали



12.1 Поперчні тріщини посередині шпали



12.1a Поперечна тріщина на кінці шпали



12.1б Сітка тріщин на поверхнях шпали, переважно на кінцях



12.1в Стирання кінця шпали від отрушення



13.1/13.2 Поперчні тріщини в зоні анкерів



21.1 Подовжня тріщина через анкери або отвори для закладних болтів



21.1a Подовжні тріщини в середній частині шпали



21.1б Вихід робочої арматури на верхню грань шпали



22.1/22.2 Подовжні тріщини в торці шпали



Рис. 4. Основні дефекти (пошкодження) шпал

Таблиця 2

Причини утворення дефектів (пошкоджень) залізобетонних шпал

Шифри дефектів	Основна причина утворення дефекту (пошкодження)	Рейтинг за розповсюдженістю
12.1в	Осідання баласту під рейковими нитками, коливання кінців шпали від вертикального навантаження	1 ⁴
12.1	Осідання баласту під рейковими нитками, вигин і злам шпали від вертикального навантаження	2 ²
13.1/13.2	Утворення тріщин від впливу горизонтальної складової навантаження на анкер. Сприяє осідання баласту під рейковими нитками та зміщення арматурного пакета вниз	3 ³
22.1/22.2	Нерівномірне осідання баласту під рейковими нитками, утворення дотичних напруг, тріщин і відколу від нерівножорсткості основи. Сприяють напруження від попереднього натягу арматури	4 ²
12.1б	Утворення сітки тріщин від корозії заповнювачів лугами цементу, їх розвиток від попереминого заморожування та відтавання. Сприяє виникненню та розвитку інших пошкоджень	5 ¹
11.1/11.2	Осідання баласту під рейковими нитками, утворення тріщин від вертикального навантаження	6 ³
21.1	Утворення тріщин від впливу горизонтальної складової навантаження на анкер	7 ³
21.1а	Корозія заповнювачів лугами цементу, утворення тріщин від попереднього натягу арматури внаслідок втрати бетоном міцності	8 ¹
12.1а	Осідання баласту під рейковими нитками, коливання кінців шпали від вертикального навантаження і утворення тріщини. Удар робочого органу виправно-підбивальних колійних машин	9 ³
21.1б	Зміщення арматурного пакета під час формування шпали на ЗЗБШ	10 ⁴
¹ Дефекти, обумовлені безпосередньо корозією бетону від ASR. ² Дефекти, утворенню і розвитку яких найбільше сприяє корозія від ASR. ³ Дефекти, утворенню і розвитку яких певною мірою сприяє корозія від ASR. ⁴ Дефекти, на утворення і розвиток яких корозія від ASR не впливає.		

У табл. 2 зазначено зв'язок дефектів шпал з корозією бетону від ASR і видно, що безпосередньо обумовлені корозією від ASR дефекти 12.1б – сітка тріщин на поверхнях шпали, переважно на кінцях (5-й за рейтингом), і 21.1а – подовжні тріщини в середній частині шпали (8-й). Дефектами, утворенню і розвитку яких найбільше сприяє корозія бетону від ASR, є 12.1 – поперечні тріщини посередині шпали (2-й),

і 22.1/22.2 – подовжні тріщини в торці шпали (4-й). Зовсім не впливає корозія від ASR на дефекти 12.1в – стирання кінця шпали від отрушення (1-й, є повністю недоліком утримання колії), і 21.1б – вихід робочої арматури на верхню грань шпали (10-й, є повністю заводським дефектом). На інші дефекти корозія від ASR також впливає, але певною обмеженою мірою.

Таблиця 3

Результати натурних досліджень ділянок залізниць з найбільшою пошкоджуваністю залізобетонних шпал

Характеристики обстежених ділянок, види дефектів	Частка шпал з дефектом, %							Середньозважене значення	Рейтинг дефекту за розповсюдженістю
	Харків – Бурги	Халимонове – Конотоп ¹	Одноробівка – Букіне	Одноробівка – Букіне	Люботин – Люботин-Зах. 2 к.	Люботин – Люботин-Зах. 3 к.	Люботин – Люботин-Зах. 1 к. ²		
Протяжність, км	0,388	10,66	14	0,3	0,6	0,6	0,2		
Кількість шпал, шт.	714	19614	22960	480	1104	1104	368		
Епюра шпал, шт./км	1840	1840	1600	1600	1840	1840	1840		
Напрацювання, млн т	84,7	387,5	203,8	220,7	277,4	174,4	360,3	282	
Строк експлуатації, р.	5	11	10	13	13	12	12	10,5	
12.1в	0	0	78	0,2	0,1	0,1	0	38,7	1 ⁴
12.1	6,3	12	35	32	0	0,2	0	22,9	2 ²
13.1/13.2	0	33	9,5	2,3	0,7	0	0	18,7	3 ³
22.1/22.2	0	41	1,5	0	0,1	5,5	0	18,2	4 ²
12.1б	0	0	34	32	1,5	4,3	6,5	17,4	5 ¹
11.1/11.2	0	10	0	0	0	0	0	4,2	6 ³
21.1	0	4	1,1	0	0	0	0	2,2	7 ³
21.1а	0	0	3,9	0,6	1,4	1,8	0	2,0	8 ¹
12.1а	0	0	2,1	0,6	0	0	0	1,0	9 ³
21.1б	0	0	0	2	0	0	0	0	10 ⁴

Вплив корозії бетону від ASR на виникнення і розвиток пошкоджень (дефектів) у шпалах пояснюється тим, що внаслідок ASR в бетоні виникають розтягувальні напруження, які призводять до утворення просторової сітки мікротріщин (на поверхні видно, як дефект 12.1б, рис. 4). Її розвиток обумовлює зниження міцності бетону на розтяг. Оскільки шпали є попередньо напруженими з повністю ізотропним армуванням у подовжньому напрямку, а попереднє напруження створило розтягувальні напруження у поперечному напрямку, у шпалах виникають переважно подовжні

тріщини (дефекти 21.1а, 22.1/22.2, 21.1). Утворенню поперечних тріщин (дефекти 11.1/11.2, 12.1, 12.1а, 13.1/13.2), якому запобігає попереднє напруження, зниження міцності бетону на розтяг лише сприяє, а основними причинами є конструктивні особливості шпал, порушення вимог до утримання колії тощо (табл. 2). З викладеного можна також зробити висновок щодо більшої вразливості попередньо напружених залізобетонних конструкцій для пошкоджень, які спричиняє корозія бетону від ASR, порівняно зі звичайними залізобетонними або бетонними конструкціями.

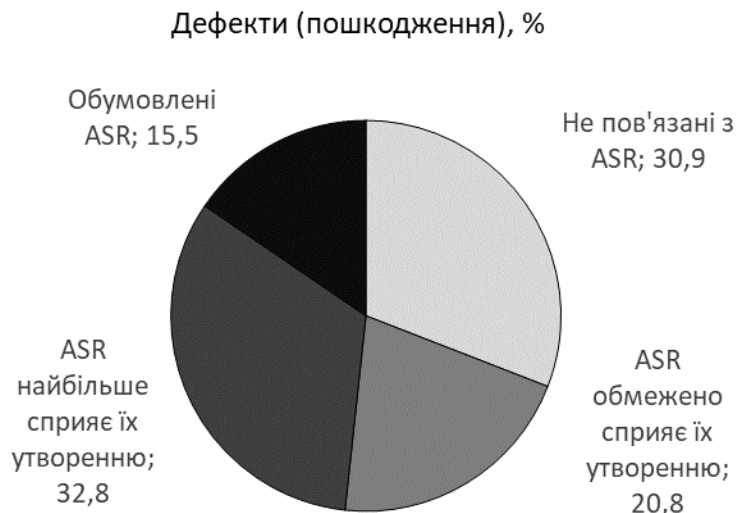


Рис. 5. Розподіл частки дефектів (пошкоджень) від їх загальної кількості за їх зв'язком з корозією бетону, обумовленою ASR

Розподіл частки дефектів (пошкоджень) від їх загальної кількості за їх зв'язком з корозією бетону, обумовленою ASR, обчислено за даними табл. 3 і подано на діаграмі рис. 5. Із рис. 5 видно, що 15,5 % всіх дефектів шпал безпосередньо обумовлені корозією бетону від ASR. 32,8 % дефектів корозія від ASR сприяє найбільше, ще 20,8 % – певною обмеженою мірою. Лише 30,9 % дефектів у жодному разі не пов'язані з корозією бетону від ASR.

Висновки

1. Корозію бетону шпал від ASR в Україні почали виявляти з 2000-х рр. внаслідок безсистемної зміни постачальників заповнювачів і цементу та модернізації виробництва цементними заводами, яка призвела, з одного боку, до підвищення активності цементу, що дозволило скоротити тепловологісну обробку шпал, а з другого – до підвищення вмісту лугів понад 0,6 %.

2. Зі всіх конструкцій з бетону корозія від ASR найшвидше протікає саме у підрейкових основах залізниць – її ознаки з'являються в середньому через 2,8 року експлуатації, та фундаментах опор контактної мережі – через 3 роки, тоді як для інших конструкцій ці ознаки з'являються пізніше: для мостових конструкцій – через 3,7 року, автодорожніх покриттів – через

6,9 року. Це обумовлено особливостями конструкції та умов експлуатації шпал, у т. ч., можливо, додатковим до обводненості впливом струмів витоку.

3. Швидкість корозії від ASR в конструкціях в Україні набагато більша (ознаки корозії з'являються в середньому через 2,2 року), ніж у країнах Північної Америки, Центральної та Північної Європи (6,1 і 6,4 року, відповідно), що пояснюється більш широким застосуванням добавок в бетони, досконалішою нормативною базою та культурою її дотримання в останніх.

4. ASR по-різному впливає на утворення та розвиток дефектів шпал:

- безпосередньо обумовлює 15,5 % дефектів, зокрема 12.1б – сітка тріщин на поверхнях шпали, переважно на кінцях (5-й за розповсюдженістю), і 21.1а – подовжні тріщини в середній частині шпали (8-й);

- найбільше сприяє утворенню і розвитку 32,8 % дефектів, зокрема 12.1 – поперечні тріщини посередині шпали (2-й), і 22.1/22.2 – подовжні тріщини в торці шпали (4-й);

- зовсім не впливає на 30,9 % дефектів, зокрема 12.1в – стирання кінця шпали від отрушення (1-й, є повністю недоліком утримання колії), і 21.1б – вихід робочої

арматури на верхню грань (10-й, є повністю заводським дефектом);

- обмежено сприяє виникненню і розвитку інших 20,8 % дефектів.

5. Вплив корозії бетону від ASR на виникнення пошкоджень (дефектів) у шпалах пояснюється тим, що внаслідок ASR в бетоні виникають розтягувальні напруження, які призводять до утворення просторової сітки мікротріщин і зниження міцності бетону на розтяг. Оскільки попереднє напруження арматури створило розтягувальні напруження у поперечному напрямку, у шпалах виникають переважно подовжні тріщини. Утворенню поперечних

тріщин, якому запобігає попереднє напруження, зниження міцності бетону на розтяг лише сприяє, а основними причинами є конструктивні особливості шпал, порушення вимог до утримання колії тощо. Отже, попередньо напружені залізобетонні конструкції є більш уразливими до пошкоджень, які спричиняє корозія бетону від ASR, порівняно зі звичайними залізобетонними або бетонними конструкціями.

6. Для підвищення достовірності цих висновків рекомендується виконати фізико-хімічні дослідження бетону шпал з різними дефектами.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.2.6-209:2016. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage?id_doc=64108.
2. ДСТУ 7571:2014. Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63585.
3. Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский, Б. А. Евдокимов, Н. М. Исаев и др.; под ред. А. Ф. Золотарского. Москва: Транспорт, 1980. 270 с.
4. Железобетонные шпалы / под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. Труды ХИИТа. 1966. Вып.86. 64 с.; 1969. Вып. 109. 64 с.; 1971. Вып.122. 64 с.
5. Технічні вказівки з використання старопридатних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України (ЦП-0150) / НКТБ ЦП Укрзалізниці. Київ, 2006. 56 с.
6. Експериментальні дослідження тріщиностійкості залізобетонних шпал з безпідкладковим пружним рейковим скріпленням / А. А. Пługін, С. В. Мірошніченко, О. А. Калінін та ін. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2020. Вип. 192. С. 11-23.
7. Пшінько П. О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал: автореф. дис... канд. техн. наук 05.23.01. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. 20 с.
8. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль; под ред. Ф. М. Иванова. Москва: Стройиздат, 1990. 320 с.
9. Штарк Йохан, Вихт Бернд. Долговечность бетона / пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев: Оранта, 2004. 295 с.
10. Штарк Йохан. Щелочная коррозия бетона / пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев, 2010. 166 с.
11. Розенталь Н. К., Любарская Г. В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя. *Бетон и железобетон*. 2012. № 1(6). С. 50-60.
12. Stanton T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *J. Amer. Soc. Eng.* 1940. 66(10). P. 1781-1811.
13. Kühl H. Zement-Chemie: Die Erhärtung und die Verarbeitung der hydraulischen Bindemittel. 1951. Vol. 3. Verlag Technik. 220 p.
14. Bredsdorf P., Idorn G., Kjaer A., Plum N., Poulsen E. Chemical reaction involving aggregate. In: Proc. IV Int. Sym. Chem. Cem. 1960. II. P. 749-783.

15. Nerenst P. Alment om Alkali Reak tioner i Beton. The Danish National Institute of Building Research and the Academy of Technical Sciences, Committee on Alkali Reactions in Concrete, Progress Report Al. Copenhagen, 1957. 50 p.
16. Москвин В. М., Рояк Г. С. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезём заполнителя. Москва: Госстройиздат, 1962. 164 с.
17. Gudmundsson G., Asgeirsson H. Some Investigation on Alkali Aggregate Reaction. 1975. P. 211-220.
18. Hobbs D. W. Alkali-silica reaction in concrete, London, 1988. 183 p.
19. Lagerblad & Trägårdh. Alkalisilica reactions in Swedish Concrete. Stockholm, 1992. 74 p.
20. Jensen V. Alkali aggregate reaction in Southern Norway: thesis. Trondheim, 1993. 265 p.
21. American Concrete Institute. State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity. 1998. 29 p.
22. Bakker J. D. ASR in 20 bridges in and over motorway 59 in the Netherlands. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Faults and Repair. London, cd-room. 1999. P. 8.
23. Рояк Г. С. Внутренняя коррозия бетона. *Тр. ЦНИИС*. 2002. № 210. 156 с.
24. Bodeker W. Alkalireaktion im Bauwerksbeton – Ein Erfahrungsbericht. *Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton (DAfStb)*. 2003. 539 p.
25. Jensen V., Merz C. Alkali-aggregate reaction in Norway and Switzerland – survey investigations and structural damage. Proceedings of the 13th ICAAR. Trondheim. 2008. P. 785-795.
26. Andiç-Çakır, Ö., Çopuroğlu, O., Katayama, T. A Review of Alkali-Silica Reactivity in Turkey: A Case Study From Izmir, west Anatolia. Proceedings of the 14th ICAAR. Austin. 2012. 10 p.
27. Pyu H., Ferreira M., Holt E. Assessing the extent of AAR in Finland. Proceedings of the 14th ICAAR. Austin. 2012. 6 p.
28. Krivenko P., Kovalchuk O. Influence of type of alkaline activator on durability of alkali activated concrete using aggregates capable to alkali-silica reaction. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. P. 180-188.
29. Щелочные и щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны / В. Д. Глуховский, А. А. Волянский, В. А. Гончаров, П. В. Кривенко. Київ: Вища школа, 1979. 232 с.
30. Високорухомі шлаколузні бетоны з підвищеною ранньою міцністю / П. В. Кривенко, І. І. Руденко, О. М. Петропавловський, О. П. Константиновський. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 93. №3. С. 117-124.
31. Рекомендації з виготовлення залізобетонних шпал у відповідності до ТУ У 01116472.021-97 (для Київського експериментального заводу залізобетонних шпал) / ХарДАЗТ. Харків, 2000. 58 с.
32. Рекомендації з удосконалення технології виробництва залізобетонних шпал у відповідності з ТУ У 01116472.021 (для Коростенського заводу залізобетонних шпал) / ХарДАЗТ. Харків, 2001. 123 с.
33. Гев'юк І. М. Мультиmodalні композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та модифіковані бетоны на їх основі: дис... канд. техн. наук. 05.23.05. Львів: НУ «ЛП», 2018. 194 с.
34. Досвід експлуатації залізобетонних шпал з пружними рейковими скріпленнями, розробленими в УкрДАЗТ / А. М. Плугін, А. А. Плугін, Ю. Л. Тулей, С. В. Мірошніченко та ін. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2014. Вип. 148. Ч. 2. С. 92-103.
35. Досвід експлуатації пружних рейкових скріплень типу PRS і залізобетонних шпал із ними / А. А. Плугін, А. М. Плугін, С. В. Мірошніченко та ін. *Українські залізниці*. 2015. № 3–4. С. 60-64.

36. Plugin A. A., Miroshnichenko S. V., Lobiak O. V., Kalinin O. A., Plugin D. A. Crack resistance of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 1002(1). 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/1002/1/012010.

Плугін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Крикун Оксана Петрівна, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: 0509ksushka@gmail.com.

Зінченко Владислава Володимирівна, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. E-mail: zinchenko4@kart.edu.ua.

Борзяк Ольга Сергіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Дудін Олексій Аркадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6838-1669. E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel. +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Krykun Oksana, postgraduate student, department of railway track and transport structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: 0509ksushka@gmail.com.

Zinchenko Vladyslava, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. E-mail: zinchenko4@kart.edu.ua.

Borziak Olga, PhD (Tech), associate professor, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Dudin Oleksii, PhD (Tech), associate professor, department of railway stations and units. Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6838-1669. E-mail: dudin@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 31.03.2021 р.

УДК 624.191.951

МОДЕЛЬ ПРОНИКНЕННЯ ІН'ЄКЦІЙНИХ ЦЕМЕНТНИХ РОЗЧИНІВ У ЗАОБРОБКОВІ ТРІЩИНУВАТІ СКЕЛЬНІ ПОРОДИ

Д-р техн. наук А. А. Плугін, кандидати техн. наук О. А. Калінін, С. В. Мірошніченко,
асист. А. С. Зверєва, магістранти В. М. Голіней, М. С. Ляхов

INJECTION MODEL OF CEMENT MORTAR PENETRATION INTO CRACKED ROCKS BEHIND WALLING

D. Sc. (Tech.) A. Plugin, PhD (Tech.) O. Kalinin, PhD (Tech.) S. Miroshnichenko,
assistant A. Zvierieva, master V. Holinei, master M. Liakhov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241660>

Анотація. Визначено фактори, що найбільше впливають на глибину проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи від природних і технологічних факторів, розроблено моделі залежностей глибини проникання від цих факторів. У результаті дослідження моделей встановлено величини технологічних факторів, у т. ч. динамічної в'язкості розчину, що забезпечують потрібне проникнення цементних

розчинів. Показано, що застосування добавок-суперпластифікаторів дозволяє ефективно забезпечувати підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою. Удосконалено й опрацьовано технологію ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за обробку підземних споруд та в масивні конструкції штучних споруд. Технологію рекомендовано застосовувати для гідроізоляції та підвищення несучої здатності конструкцій тунелів, водопропускних труб, мостових опор.

Ключові слова: тунель, обробка, тріщинувата порода, ін'єкційний розчин, глибина проникнення, динамічна в'язкість.

Abstract. The natural and technological factors influencing on the depth of injection cement mortars penetration into the cracked rocks and emptiness under the lining of mountain tunnels have been studied. There are the width of cracks in rocks and groundwater pressure in them, the dynamic viscosity of the solution, which is determined by the content of additives-superplasticizer and water-cement ratio W/C, the magnitude and duration of pressure during the projection (crimping). These facts were established after the analytical of literature sources and the analysis of features, design and a technical condition of real tunnel, geological structure of processing rocks under their lining. Based on the fundamental rheological equation - Newton's law in viscous flow models of dependences of depth of penetration on factors mentioned above are developed. Because of research of these models the sizes of technological factors, including dynamic viscosity of the mortar, providing the required penetration of cement mortars were received. To ensure the penetration of the solution to a depth of 10 m in cracks with a width of 10 mm, the dynamic viscosity should not exceed over 0.05 Pa·s, and in cracks of 1 mm – 0.01 Pa·s. To ensure the penetration of the solution to a depth of 2 m in cracks with a width of 1 mm, the dynamic viscosity should be in the range of 0.03–0.1 Pa·s, and in cracks of 0.1 mm – 0.0025–0, 01 Pa·s. Superplasticizers allows reducing the dynamic viscosity of solutions to such values and effectively increasing the depth of their penetration into cracks and, as a result increasing the water resistance and load-bearing capacity of the fractured rock. The technology of injecting cement mortars with superplasticizer additives has been improved and developed for: the reconstruction of underground structures and massive artificial structures; the designing of a spherical bearing between galvanized concrete without a bald spot and the exposed metal beams. The technology is recommended to be used for waterproofing and increasing the bearing capacity of tunnel, piers, bridges, and for the device of a laying layer between a without-ballast reinforced concrete bridge plate and longitudinal beams of metal bridges.

Keywords: tunnel, retaining walls, fractured rock, injection solution, penetration depth, dynamic viscosity.

Вступ. На залізницях України експлуатується понад 40 залізничних тунелів. Вік більшості з них перевищує 50 років, а значної кількості – 100 років. Під час експлуатації внаслідок впливу природних (підземних вод, поперемінного заморожування й відтавання) та антропогенних факторів (агресивних газів, струмів витоків) обробка тунелів зазнає пошкоджень і, отже, фізичного зносу [1, 2]. Найбільш руйнівним з цих факторів є вплив підземних вод, які містяться у тріщинах скельних порід, ґрунтах і намагаються фільтрувати з масиву

до внутрішнього простору тунелю (рис. 1). Фільтрація підземних вод всередину тунелю спричиняє вилуговування забутовки або цементного розчину, який під час будівництва нагнітали у зазор між обробкою і масивом, суфозію ґрунту, внаслідок чого за обробкою утворюються обводнені порожнини. Це ще прискорює зазначені руйнівні процеси, а у підсумку призводить до порушення спільної роботи обробки з масивом, її деформації аж до порушення габариту і навіть завалу.



Рис. 1. Витікання води через ін'єктор, встановлений в шпарину, просвердлену в обробці тунелю до заобробкового простору

Запобігти фільтрації та її руйнівному впливу дозволяє гідроізоляція обробки. Через неприпустимість зменшення габариту тунелю додатковими конструкціями найбільш розповсюдженими способами гідроізоляції обробки експлуатованих тунелів є ін'єкційні, здійснювані шляхом нагнітання за обробку глиняних, полімерних, цементних розчинів [1, 2]. Глиняні розчини найдешевші, задовільно гідроізольють обробку, проте не здатні відновити її несучу здатність і в теперішній час майже не застосовуються. Сучасні полімерні розчини, особливо ті, що розширюються, з високою ефективністю гідроізольють обробку та відновлюють її несучу здатність, проте є дуже коштовними. Цементні розчини здатні добре відновлювати як водонепроникність, так і несучу здатність тунельної обробки [3, 4], проте забезпечення їх проникної здатності у ґрунти та тріщини скельних порід залишається неповністю вирішеним завданням, у т. ч. через складність контролю глибини проникнення після ін'єктування. Стаття присвячена розробленню моделі проникнення ін'єкційних цементних

розчинів у заобробкові скельні породи тунелів і дослідженню залежності глибини проникнення від природних і технологічних факторів. Виходячи з викладеного тема дослідження є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нагнітання цементних розчинів застосовують не тільки під час будівництва транспортних тунелів, а й під час будівництва і ремонту тунелів метрополітену [5, 6], тунелів і колекторів систем водовідведення [7–9]. В цих випадках також забезпечується заповнення зазору між гірською виробкою і конструкцією обробки з метою забезпечення рівномірного передавання навантаження та запобігання подальшої інфільтрації в споруду підземних або ґрунтових вод або, навпаки, ексфільтрації стічних вод із каналізаційних тунелів і колекторів.

Ін'єкційні способи тампонажу (надання водонепроникності) всього ґрунтового масиву з тріщинуватих скельних порід добре відпрацьовані під час буріння свердловин [10], проходження гірських виробок [11, 12]. Для тампонажу застосовували в основному цементні

розчини з водоцементним відношенням $V/C = 0,8-1,0$, вважаючи, що за рахунок відтиснення надлишку води у тонкі тріщини V/C зменшується до $0,32-0,35$.

Створення тампонажних розчинів, способів їх ін'єктування і технологічного контролю ґрунтується на закономірностях і методах фізико-хімічної механіки та реології дисперсних систем [13]. Ґрунтуючись на зазначених закономірностях, у роботах [14–17] було обґрунтовано реологічні властивості суперпластифікованих цементно-водних суспензій для ін'єктування за обробку тунелів [14–16], у міжтрубний зазор у разі ремонту каналізаційних колекторів методом вставок [17]. У статті [18] обґрунтовано проникнення силікатних розчинів у пористий ґрунт. У роботах [14, 17] для аналізу закономірностей руху розчину у тріщині в породі, міжтрубному зазорі застосовано закон в'язкості Ньютона

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (1)$$

де τ – напруження зсуву, Н/м^2 ,

η – динамічна в'язкість розчину, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

dv/dx – поперечний напрямку течії градієнт її швидкості, $1/\text{с}$.

Було показано, що глибина проникнення розчину в скельні породи залежить від ширини розкриття тріщин в них, розміру частинок розчину, його динамічної в'язкості, тривалості прикладання тиску нагнітання.

У статті [19] проаналізовано зв'язок між фундаментальними реологічними властивостями (в'язкістю, $\text{Па}\cdot\text{с}$, граничним опором зсуву, Па) і технологічними реологічними властивостями розчинів (різними видами глибини проникнення інденторів, мм, осідання, см, ширини розтікання, см/мм, тривалості витікання через отвори, с), одержано теоретичні та експериментальні моделі зв'язку між ними. У роботах [20–23] отримано також добре

узгоджені між собою теоретичні та експериментальні моделі зв'язку між фундаментальними реологічними властивостями й електричними показниками роботи електропривода, що забезпечує рух кулеподібного індентора крізь розчин, а в дослідженнях [22, 23] ці моделі застосовано для розроблення автоматизованої системи регулювання складу розчину безпосередньо під час його ін'єктування у міжтрубний зазор у разі ремонту каналізаційних колекторів методом вставок.

У роботах [24, 25] за допомогою ротаційних віскозиметрів встановлено, що динамічна в'язкість цементного розчину дорівнює за $V/C = 0,5$ – $\eta = 0,2-0,3$ $\text{Па}\cdot\text{с}$, а за $V/C = 0,32-0,35$ збільшується до 10 $\text{Па}\cdot\text{с}$. У роботах [15, 16] встановлено, що динамічна в'язкість цементного розчину з добавками суперпластифікаторів, що є аніонними ПАР, знижується до величин, близьких до $\eta = 0,001$ $\text{Па}\cdot\text{с}$ навіть у разі зниження V/C до $0,35-0,32$.

Отже, для аналізу залежності глибини проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи від природних і технологічних факторів знайдено теоретичні передумови. Визначено і прийнято до аналізу фактори, що найбільше впливають на глибину проникнення: ширина розкриття тріщин в породах, динамічна в'язкість розчину, тривалість прикладання тиску під час ін'єктування. Аналіз доцільно здійснювати на основі рівняння (1).

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – встановлення залежності глибини проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи від природних і технологічних факторів, а також умов забезпечення встановленої глибини проникнення.

Методи дослідження: аналіз за літературними даними факторів, що впливають на глибину проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи, побудова фізичної і

математичної моделі проникнення, розрахунковий експеримент з дослідження залежності глибини проникнення від природних і технологічних факторів.

Завдання дослідження: розробити фізичну і математичну моделі проникнення ін'єкційного розчину в тріщину; виконати дослідження залежності глибини проникнення розчину в тріщини від тривалості опресування (ін'єктування) за різних величин інших природних і технологічних факторів; виконати дослідження залежності динамічної в'язкості цементного розчину, потрібної для проникнення розчину на глибину l , від l за різних величин інших природних і технологічних факторів. З урахуванням отриманих результатів удосконалити технологію ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за обробку підземних споруд та в масивні конструкції штучних споруд.

Основна частина дослідження.

Розроблення фізичної і математичної

моделей проникнення ін'єкційного розчину в тріщину. Схема обробки зі встановленим ін'єктором, заобробкової скельної тріщинуватої породи та порожнини за обробкою наведена на рис. 2. З порожниною сполучається одразу декілька тріщин. Порожнина і тріщини заповнені під тиском P_v підземною водою, яка одразу після свердлування шпори починає витікати крізь встановлений в неї ін'єктор (рис. 2). Під час ін'єктування спочатку відбувається заповнення розчином порожнини, при цьому тиск на манометрі розчинонасоса є мінімальним. Після заповнення порожнини починається проникнення розчину в тріщини і течія в них. Це супроводжується різким збільшенням тиску на манометрі. Після досягнення тиском певної величини P_i , яка визначається потужністю розчинонасоса або станом обробки, здійснюють опресування – витримку тиску протягом часу t для забезпечення проникнення розчину у тріщини на потрібну глибину l .

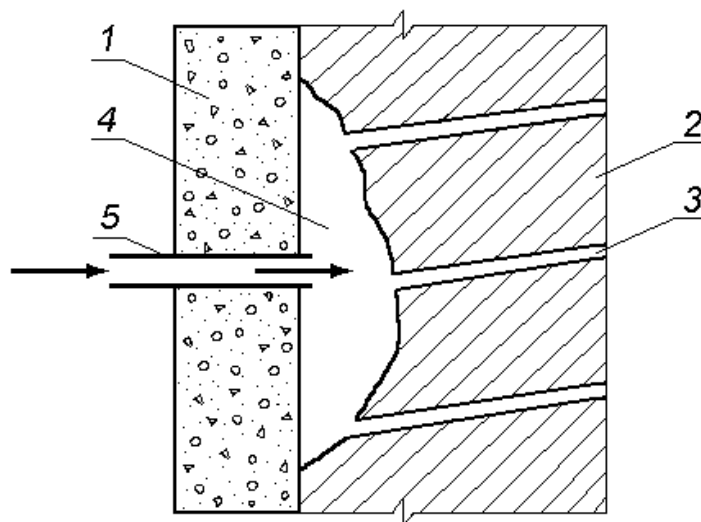


Рис. 2. Схема порожнини за обробкою тунелю:
1 – обробка; 2 – скельний ґрунт; 3 – тріщини; 4 – порожнина; 5 – ін'єктор

Окрема тріщина представлена заповненим водою безкінечно довгим плоским капіляром шириною b_T , товщиною h_T ($b_T \gg h_T$). Площа поверхонь заповненої

частини тріщини S_{Π} і поперечного перерізу тріщини S_T складуть

$$S_{\Pi} = 2l \cdot (h_T + b_T) \approx 2b_T l. \quad (2)$$

$$S_T = b_T h_T. \quad (3)$$

Розчин тече в капілярі під тиском ін'єктування P_i . Течії заважає природний тиск води в тріщині P_B і тиск P_T від сили тертя в тріщині F . Стаціонарний потік зі швидкістю v встановлюється за умови

$$P_T = P_i - P_B. \quad (4)$$

Заповнення тріщини щільною водою дозволяє зневажити ефектами, пов'язаними з утворенням меніска.

Подамо рівняння (1) у наведеному вигляді і знайдемо з нього силу тертя F_T :

$$\frac{F_T}{S_{\Pi}} = \eta \cdot \frac{v}{\delta}; \quad (5)$$

$$F_T = \eta \cdot S_{\Pi} \cdot \frac{v}{\delta}, \quad (6)$$

де v/δ – поперечний напрямку течії градієнт її швидкості, $1/c$;

δ – товщина шару розчину, в якому швидкість течії змінюється від 0 до v , м.

Тиск від сили тертя складе

$$P_{\text{т}} = \frac{F_T}{S_{T\Pi}} = \eta \cdot \frac{S_{\Pi}}{S_T} \cdot \frac{v_{\Pi}}{\delta} = \eta \cdot \frac{2b_T l}{b_T h_T} \cdot \frac{v_{\Pi}}{\delta} = \eta \frac{2lv_{\Pi}}{h_T \delta}. \quad (7)$$

Підставивши рівняння (7) у формулу (4), отримаємо

$$P_i - P_B = \eta \frac{2lv}{h_T \delta}. \quad (8)$$

Під час ін'єктування, зокрема стадії опресування, потік розчину через тріщини дорівнюватиме

$$Q = V_T / t, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (9)$$

де V_T – об'єм розчину, що ін'єктується у тріщини, які відкриваються у порожнину, м^3 ;

t – тривалість опресування, с.

Лінійна швидкість руху розчину у тріщинах складе

$$v = Q / S_T, \quad (10)$$

де S_T – сумарна площа перерізу тріщин, які відкриваються у порожнину,

$$S_T = \gamma \cdot \frac{V_{\Pi}}{h_{\Pi}}, \quad (11)$$

де γ – поверхнева тріщинуватість скельної породи, відн. од.;

V_{Π} – об'єм порожнини, який визначається під час ін'єктування, м^3 ;

h_{Π} – середня глибина порожнини, яка визначається під час свердлування шпари, м.

Підставивши (11) у (10), потім (12) у (8) і (9) у (13), отримаємо:

$$v = \frac{Qh_{\Pi}}{\gamma V_{\Pi}}; \quad (12)$$

$$P_i - P_B = \frac{2\eta l Q h_{\Pi}}{h_{\text{т}} \delta \gamma V_{\Pi}}; \quad (13)$$

$$P_i - P_B = \frac{2\eta l h_{\Pi} V_{T\Pi}}{h_{\text{т}} \delta \gamma V_{\Pi} t}. \quad (14)$$

Об'єм розчину, що прийняли тріщини, з урахуванням (11) становитиме:

$$V_T = S_T l = \gamma \frac{V_{\Pi} l}{h_{\Pi}}. \quad (15)$$

Підставивши (15) у вираз (14), одержимо рівняння стаціонарного розчину у тріщинах

$$P_i - P_B = \frac{2\eta h_{\pi}}{h_{\pi} \delta \gamma W_{\pi} t} \times \gamma \frac{V_{\pi} l}{h_{\pi}} = \frac{2\eta l^2}{h_{\pi} \delta \cdot t}. \quad (16)$$

Рівняння (16) є моделлю, придатною для аналізу технологічних режимів ін'єктування. Зокрема, за ним можна дослідити залежність глибини проникнення розчину в тріщини l від тривалості опресування t та інших природних і технологічних факторів

$$l = \sqrt{\frac{(P_i - P_B) \cdot h_{\pi} \delta \cdot t}{2\eta}}, \quad (17)$$

або дослідити залежність потрібної для забезпечення певної глибини проникнення розчину l тривалості опресування t від l та інших факторів

$$t = \frac{2\eta l^2}{h_{\pi} \delta (P_i - P_B)}, \quad (18)$$

або дослідити залежність глибини проникнення розчину l від динамічної в'язкості розчину

$$\eta = \frac{h_{\pi} \delta (P_i - P_B) t}{2l^2}. \quad (19)$$

Результати дослідження та їх обговорення

Виконано дослідження:

- залежності (17) глибини проникнення розчину в тріщини l від тривалості опресування (ін'єктування) t за різних величин інших природних і технологічних факторів – ширини розкриття тріщин h_{π} , наявності (вмісту) у розчині добавки-суперпластифікатора СП, водоцементного відношення В/Ц, динамічної в'язкості розчину η , тиску опресування P_i ;

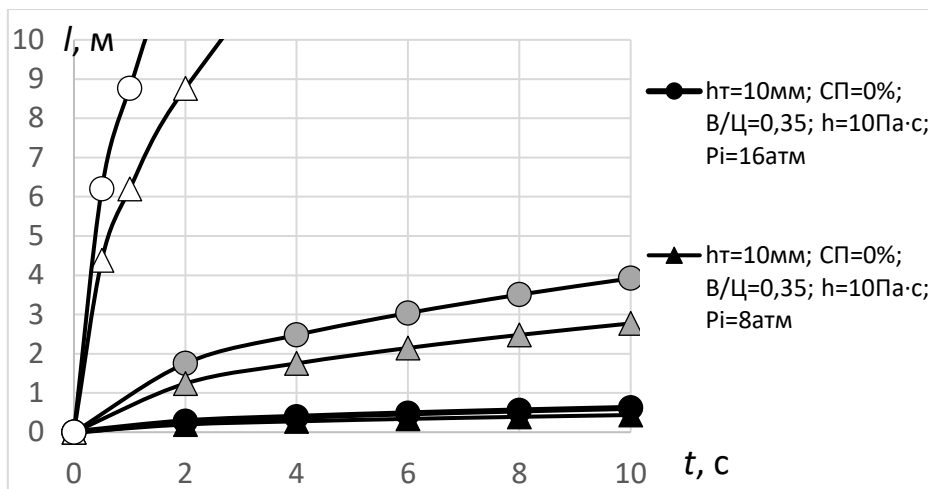
- залежності (19) динамічної в'язкості цементного розчину η , потрібної для проникнення розчину на глибину l , від l за різних величин інших природних і технологічних факторів – h_{π} , P_i , t .

Дослідження проведено для значень та меж величин цих факторів: h_{π} – від 0,1 до 10 мм; вмісту добавки суперпластифікатора СП – 0 і 1 % від маси цементу, В/Ц – 0,35 і 0,5, яким відповідають значення η : СП = 0 %, В/Ц = 0,35 – $\eta = 10$ Па·с; СП = 0 %, В/Ц = 0,5 – $\eta = 0,25$ Па·с; СП = 1 %, В/Ц = 0,35 – $\eta = 0,005$ Па·с; P_i – 16 і 8 атм. Тиск підземної води P_B прийнято рівним 0. Результати дослідження у вигляді відповідних графіків залежностей наведені на рис. 3 і 4.

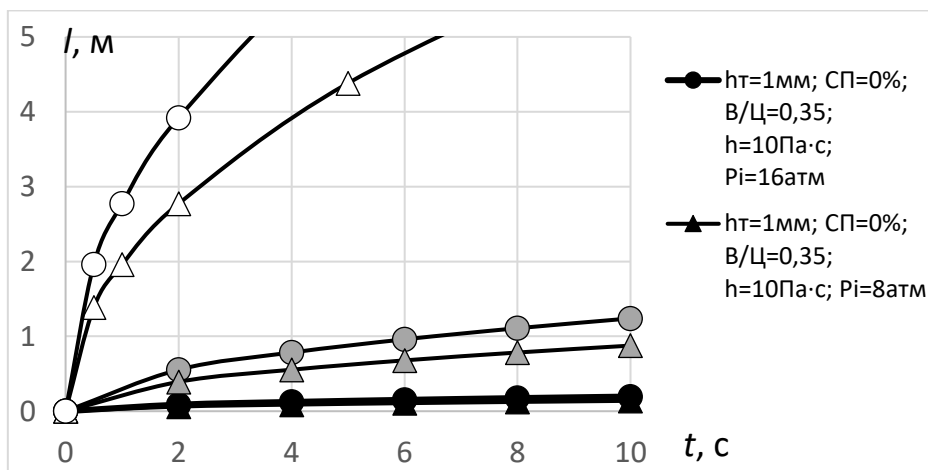
Із рис. 3 видно, що цементний розчин без добавок з В/Ц = 0,35, яке забезпечує високі показники водонепроникності та міцності, не здатний проникати у тріщини з великим розкриттям 10 мм на глибину більше 0,5 м навіть під максимальним тиском 16 атм за великої тривалості опресування 10 хв. Збільшення В/Ц розчину без добавок до прийнятної величини 0,5 дозволяє збільшити глибину проникнення до 3–4 м. Проте у тріщини з меншою шириною розкриття 1 мм розчин без добавок проникає на глибину за В/Ц = 0,35 – не більше 0,1 м, а з В/Ц = 0,5 – не більше 0,8–1,2 м, а у тріщини 0,1 мм майже не проникає. Отже, ефективність цементних розчинів без добавок для підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою не може бути високою.

Збільшити глибину проникнення цементних розчинів дозволяє застосування добавок-суперпластифікаторів, які знижують їх динамічну в'язкість до величин 0,005 Па·с. Розчин з добавкою-суперпластифікатором навіть за В/Ц = 0,35 проникає у тріщини шириною розкриття 10 мм на глибину 10 м за 0,5–1 хв, у тріщини 1 мм – за 3–7 хв. Тільки такий розчин проникає у тріщини шириною розкриття 0,1 мм, зокрема, за 10 хв на глибину 2 м під тиском 8 атм і на глибину 2,7 м під тиском 16 атм. Отже, ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами дозволяє ефективно забезпечувати підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою.

а



б



в

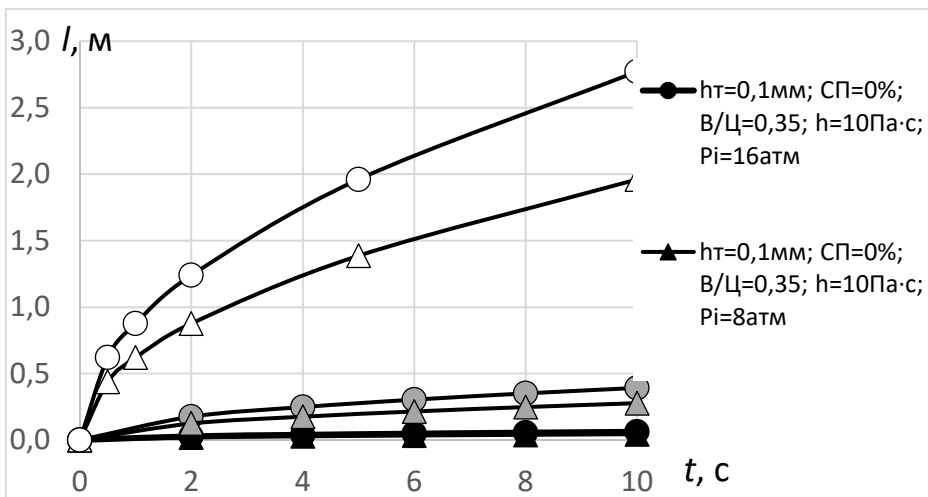


Рис. 3. Залежність глибини проникнення цементного розчину l від тривалості ін'єктування (опресування) t за різного вмісту добавки суперпластифікатора СП, водоцементного відношення В/Ц, в'язкості розчину η , тиску опресування P_i у тріщини шириною розкриття: а – 10 мм; б – 1 мм; в – 0,1 мм

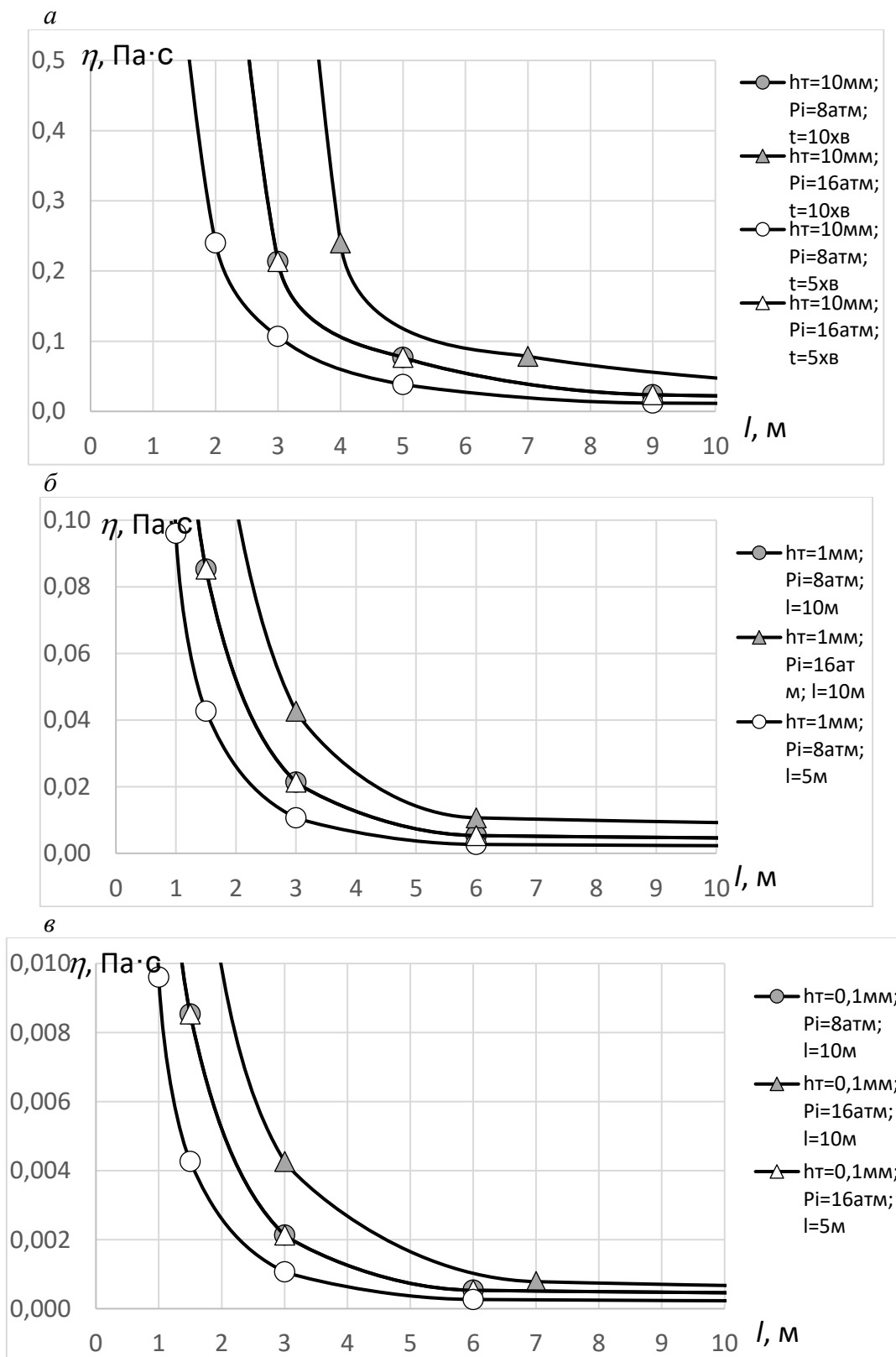


Рис. 4. Залежність динамічної в'язкості цементного розчину η , потрібної для проникнення розчину на глибину l в тріщини шириною розкриття h_t , від l , різної за різного тиску опресування P_i у тріщини шириною розкриття: *а* – 10 мм; *б* – 1 мм; *в* – 0,1 мм

Із рис. 4 видно, що для проникнення цементного розчину на глибину $l = 10$ м динамічна в'язкість η не має перевищувати: у тріщини шириною розкриття $h_T = 10$ мм – $0,05$ Па·с; $h_T = 1$ мм – $0,01$ Па·с; $h_T = 0,1$ мм – $0,001$ Па·с. Для проникнення на глибину $l = 2$ м динамічна в'язкість η не повинна перевищувати залежно від тиску й тривалості опресування: у тріщини $h_T = 10$ мм –

$0,25$ – 1 Па·с; $h_T = 1$ мм – $0,03$ – $0,1$ Па·с; $h_T = 0,1$ мм – $0,0025$ – $0,01$ Па·с.

Результати досліджень дозволили удосконалити розроблену раніше технологію ремонту тунелів шляхом ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за їх обробку (рис. 5, а) [25] та застосувати її для ремонту не тільки тунелів, а й водопропускних труб, мостових опор (рис. 5, б) [26].

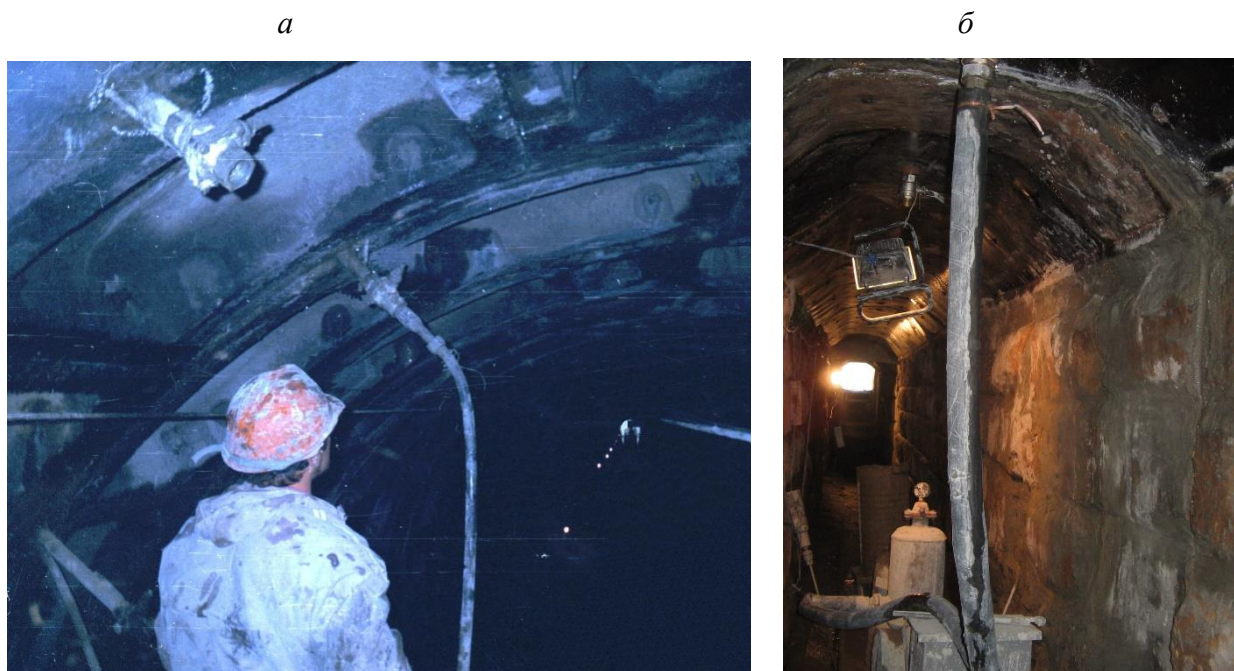


Рис. 5. Ін'єктування цементного розчину з добавкою-суперпластифікатором:
 а – за обробку залізничного тунелю на 128 км ділянки Самбір-Сянки Львівської залізниці;
 б – в зазор між сталевією оболонкою металоін'єкційної сорочки та обробкою водопропускної труби на 110 км дільниці Харків – Куп'янськ Південної залізниці

Висновки та рекомендації

1. Для аналізу залежності глибини проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи l від природних і технологічних факторів як теоретичні передумови обрано закон в'язкості Ньютона. Визначено фактори, що найбільше впливають на глибину проникнення: ширина розкриття тріщин в породах h_T і тиск підземної води в них P_B , динамічна в'язкість розчину η

(визначається наявністю та вмістом добавки-суперпластифікатора та водоцементним відношенням В/Ц), величина P_i і тривалість t прикладання тиску під час ін'єктування (опресування). Розроблено моделі залежностей l від цих факторів.

2. В результаті дослідження моделей встановлено, що ефективність цементних розчинів без добавок для підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною

породою не може бути високою. Збільшити глибину проникнення цементних розчинів дозволяє застосування добавок-суперпластифікаторів, які знижують їх динамічну в'язкість. Розчин з добавкою проникає у тріщини шириною розкриття 10 мм на глибину 10 м за 0,5–1 хв, у тріщини 1 мм – за 3–7 хв. Тільки такий розчин проникає у тріщини шириною розкриття 0,1 мм, зокрема за 10 хв на 2–2,7 м. Отже, ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами дозволяє ефективно забезпечувати підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою.

3. Встановлено величини динамічної в'язкості η , за яких забезпечується проникнення цементного розчину на глибину 10 м:

у тріщини 10 мм – не більше 0,05 Па·с; 1 мм – 0,01 Па·с; 0,1 мм – 0,001 Па·с. Для проникнення на глибину 2 м η не повинна перевищувати: у тріщини 10 мм – 0,25–1 Па·с; 1 мм – 0,03–0,1 Па·с; 0,1 мм – 0,0025–0,01 Па·с.

4. З урахуванням отриманих результатів удосконалено й опрацьовано технологію ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за обробку підземних споруд і в масивні конструкції штучних споруд. Технологію рекомендовано застосовувати для гідроізоляції та підвищення несучої здатності конструкцій тунелів, водопропускних труб, мостових опор, для влаштування прокладного шару між залізобетонним безбаластним мостовим полотном і подовжніми балками металевих мостів.

Список використаних джерел

1. Відновлення експлуатаційних властивостей матеріалів і конструкцій / А. М. Плугін, О. А. Калінін, С. І. Возненко, А. А. Плугін, С. В. Мірошніченко. Харків: ХарДАЗТ, 1999. Ч. 1. 117 с.; Ч. 2. 86 с.
2. Плугін А. А., Трикоз Л. В. Відновлення експлуатаційних властивостей основ, фундаментів, заглиблених і підземних споруд. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 141 с.
3. Гидроизоляция обводненных тоннелей / А. Н. Плугин, Арт. Н. Плугин, С. В. Мирошніченко та ін. *Автомобільні дороги та дорожнє будівництво*. 2000, № 59. С. 182–186.
4. Бетоны и растворы для восстановления эксплуатационных свойств транспортных сооружений / А. А. Плугин, А. Н. Плугин, О. А. Калинин та ін. *Будівельні конструкції*. 2009. Вип. 72. С. 357–370.
5. Петренко В. И., Петренко В. Д., Тюткин А. Л. Современные технологии строительства метрополитенов. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. 252 с.
6. Petrenko V., Tiutkin O., Heletiuk I., Tkach T. The new approach in evaluating the mechanism of the blast effect and organizing the blasting operations while tunneling. *E3S Web of Conferences*. 2020. 168. 00034.
7. Goncharenko D., Starkova O., Aleinikova A., Kolomiiets Y., Greenchuk O. Efficient method of eliminating accidental damage of sewer tunnel. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230. 02011.
8. Goncharenko D., Shumakov I., Starkova O., Aleinikova A., Mikautadze R. Methodological and computer-based support for choosing underground utility networks renovation method. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230. 02010.
9. Goncharenko D., Bondarenko D., Starkova O. Repair and refurbishment technologies for inspection shafts in deep-level sewer tunnels. *World Journal of Engineering*. 2018. 15(1). P. 48–53.
10. Булатов А. И. Тампонажные материалы и технология цементирования скважин. Москва: Недра, 1971. 328 с.

11. Polozov Ju. A., Spichak Ju. N., Lagunov V. A. Advanced grouting of 960-m-level shaft station in nagolchanskaya mine. *International Journal of Mine Water*. 1985. 4(1). P. 33–42.
12. Kipko B. Ja., Polozov Ju. A., Spichak Ju. N. Hydrosealing and consolidation of geological faults during tunnel driving. *International Journal of Mine Water*. 1984. 3(3). P. 35–41.
13. Физико-химическая механика тампонажных растворов / Н. Н. Круглицкий, И. Г. Гранковский, Г. Р. Вагнер, В. П. Детков. Київ: Наукова думка, 1974. 289 с.
14. Проницаемость гидроизоляционных составов при нагнетании в трещины скальных пород / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин та ін. *Науковий вісник будівництва*. 1999. Вип. 5. С. 31–37.
15. Експериментальні дослідження проникної здатності тампонажних розчинів / А. М. Плугін, О. А. Калінін, Арт. М. Плугін та ін. *Зб. наук. праць ХарДАЗТ*. 2000. Вип. 37. С. 3–13.
16. Количественное описание реологических характеристик цементно-водных суспензий и механизма действия на них суперпластификаторов / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Д. В. Шумик та ін. *Науковий вісник будівництва*. 2001. Вип. 12. С. 173–189.
17. Цементация межтрубного зазора при ремонте коллекторов водоотведения методом вставок / А. Н. Плугин, И. В. Коринько, А. А. Плугин та ін. *Науковий вісник будівництва*. 2002. Вип. 19. С. 162–166.
18. Увеличение проникающей способности жидкого стекла в песчаный грунт / А. Н. Плугин, О. С. Герасименко, Л. В. Трикоз, А. А. Плугин. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2007. Вип. 87. С. 108–120.
19. Донец А. В., Плугин А. А., Титов Д. М. Применимость методов контроля качества строительных смесей для систем управления их приготовлением. *Науковий вісник будівництва*. 2002. Вип. 16. С. 100–105.
20. Контроль технологичности строительных смесей с помощью прибора ЭШ-1 / А. В. Донец, В. И. Бабушкин, А. А. Плугин та ін. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2003. № 5. Ч. I. С. 40–45.
21. Plugın A., Trykoz L., Donets O., Nykytynskyj A., Pluhin A. Diagnostics and regulation of rheological characteristics for injection mortars by electromechanical sensors. *E3S Web of Conferences*. 2020. 166. 06006.
22. Plugın A., Trykoz L., Donets O., Nykytynskyj A., Pluhin A. Diagnostics and regulation of rheological characteristics for injection mortars by electromechanical sensors. *E3S Web of Conferences*. 2020. 166. 06006. DOI: 10.1051/e3sconf/202016606006.
23. Grankovskii I. G., Maul' V. P. Modification of the mixing solution for preparing a concrete mix. *Journal of applied chemistry of the USSR*. 1987. 60(4 pt 2). P. 805–808.
24. Вагнер Г. Р. Физико-химия процессов активации цементных дисперсий. Київ: Наукова думка, 1980. 200 с.
25. Інструкція щодо виконання робіт з нагнітання розчинів за обробку тунелів (ЦП-0136) / УкрДУЗТ. Київ: ЦП УЗ. 2006. 108 с.
26. Нові конструктивно-технологічні рішення ремонту залізобетонних і кам'яних мостів і водопропускних труб: Досвід експлуатації після ремонту / А. А. Плугін, С. В. Мірошніченко, О. А. Калінін та ін. *Українська залізниця*. 2018. №6 (60). С. 19–24.

Плугін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Тел.: (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Калінін Олег Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0003-3063-5659. Тел.: (057) 730-10-68. E-mail: kalinin@kart.edu.ua.

Мірошніченко Сергій Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Тел.: (057) 730-10-64. E-mail: Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Зверева Аліна Сергіївна, асистент кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4832-3760. Тел.: (057) 730-10-25. E-mail: zveirievaAS@kart.edu.ua.

Голіней Василь Михайлович, магістрант, група 223-3С-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту.

Ляхов Максим Сергійович, магістрант, група 223-3С-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Tel. (057) 730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Kalinin Oleh, PhD (Tech). Associate Professor, department building materials and structures department Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3063-5659. Tel.(057) 730-10-68.

E-mail: kalinin@kart.edu.ua.

Miroshnichenko Sergii, PhD (Tech). Associate Professor, department building materials and structures department Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Tel. (057) 730-10-64.

E-mail: Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Zvierieva Alina S., assistant, Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4832-3760. Tel.: (057) 730-10-25. E-mail: zveirievaAS@kart.edu.ua.

Holinei Vasyl, master, Group 223- 3С-Д19, Ukrainian State University of Railway Transport.

Liakhov Maksym, master, Group 212-3С-Д19, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 13.04.2021 р.

УДК 692.295:624.041

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО РАДІУСА ЗАОКРУГЛЕННЯ КУТА ЗОВНІШНЬОЇ СТІНИ

Д-р техн. наук В. О. Семко, кандидати техн. наук О. І. Юрін, Н. М. Магас, студенти А. Р. Норка, Є. Е. Пилипенко

SELECTION OF THE EXTERNAL WALL ROUNDING ANGLE OPTIMAL RADIUS

D. Sc. (Tech.) V. Semko, PhD (Tech.) O. Yurin, PhD (Tech.) N. Mahas, student A. Norka, student Y. Pylypenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241662>

Анотація. У статті проаналізовано один із способів підвищення теплозахисних властивостей ділянки кута будівлі – заокруглення зовнішньої поверхні кута зовнішньої стіни. Досліджено залежності радіуса заокруглення зовнішньої поверхні стіни від теплового потоку, що проходить крізь розрахункову ділянку зовнішнього кута стіни, витрати цегли у межах розрахункової ділянки, витрати утеплювача у межах розрахункової ділянки, величини зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення стіни для п'яти розрахункових схем. Визначено, що оптимальний радіус заокруглення кута зовнішньої стіни є 0,8 м.

Ключові слова: тепловий потік, утеплювач, огорожувальні конструкції, кут будівлі, температурні поля.

Abstract. *The article analyzes one of the ways to increase the heat-protective properties of the building corner - rounding the outer surface of the outer wall the corner. The walls of houses near the outer corner, due to their configuration, have less heat-insulating properties than the walls in other areas. This is due to the fact that the area of heat flow perception on the inner surface of the walls at an angle less than the area of heat transfer on the outer surface. Convective heat exchange near the inner surface of the corner, due to the inhibition of air movement is less than in other areas, so the amount of heat coming from the indoor air to the wall surface is less. For climatic conditions of Poltava region the research of temperature fields of calculated sections of the wall (without rounding of a corner, with rounding of a wall of various radius an external surface) with definition of a heat stream size, the minimum temperature on an internal surface of a wall and the resulted heat transfer resistance is carried out. The dependences of the rounding radius of the wall outer surface on the heat flow passing through the design area of the wall outer corner, brick consumption within the design area, insulation consumption within the design area, the amount of room area reduction due to rounding the wall for five design schemes. The analysis of dependences the constructed graphs showed that the intensive reduction of the heat flux passing through the calculated section occurs at a radius of the wall outer surface rounding of 0.9 m and more; a slight decrease in the area of the room due to the rounding of the wall occurs to a radius of curvature of 1.4 m; intensive reduction of brick volume within the calculated area occurs when the radius of curvature is more than 0.8 m, similarly to mineral wool up to 0.7 m. It is determined that the optimal radius of curvature of the outer wall is 0.8 m, it will increase the thermal properties of the angle and reduce the heat transfer coefficient by the transmission of the external enclosing structure of the building as a whole.*

Keywords: *heat flow, insulation, enclosing structures, building angle, temperature fields.*

Вступ. Стіни будинків біля зовнішнього кута внаслідок своєї конфігурації мають менші теплозахисні властивості, ніж стіни на інших ділянках. Пов'язано це з тим, що площа сприйняття теплового потоку по внутрішній поверхні стін біля кута менше площі тепловіддачі по зовнішній поверхні. Конвективний теплообмін біля внутрішньої поверхні кута внаслідок гальмування руху повітря менший, ніж на інших ділянках, тому кількість тепла, що надходить від внутрішнього повітря до поверхні стіни, менша.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення теплозахисних якостей ділянки кута розглядалися в роботі [1]. В ній було запропоновано використання додаткового утеплення кута з зовнішньої та внутрішньої поверхні, а також в середині стіни. В [2–3] наведені результати дослідження оптимальної довжини додаткового утеплення кута при різних варіантах розташування утеплювача. В [4–6] досліджувався вплив розташування вікна

та його елементів (відкосу, перемички) на тепловтрати огорожувальної конструкції. Дослідження температурних полів, визначення теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій будівель та їх елементів для визначення оптимальних шляхів підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій і будівлі в цілому розглядалося в [7–9].

Визначення мети та завдання дослідження. Визначення оптимального радіуса заокруглення зовнішньої поверхні кута зовнішньої стіни, що є одним зі способів підвищення теплозахисних властивостей ділянки кута.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв'язати такі завдання:

1. Виконати дослідження температурних полів п'яти розрахункових ділянок стіни (без заокруглення кута, з заокругленням зовнішньої поверхні стіни радіусом 0,5, 1, 1,5, 2 м) з визначенням величини теплового потоку, мінімальної температури на внутрішній поверхні стіни та приведеного опору теплопередачі;

2. Визначити для п'яти розрахункових схем значення теплового потоку, що проходить крізь розрахункову ділянку зовнішнього кута стіни, витрати цегли у межах розрахункової ділянки, витрати утеплювача у межах розрахункової ділянки, величини зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення стіни;

3. Проаналізувати залежності радіуса заокруглення зовнішньої поверхні стіни від теплового потоку, що проходить крізь розрахункову ділянку зовнішнього кута стіни, витрати цегли у межах розрахункової ділянки, витрати утеплювача у межах розрахункової ділянки, величини зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення стіни та визначити оптимальний радіус заокруглення кута зовнішньої стіни.

Основна частина дослідження.

Дослідження виконувалися для кліматичних умов Полтавської області. Розрахункова температура зовнішнього повітря приймалася $t_3 = -22\text{ }^\circ\text{C}$ (I-ша температурна зона), а внутрішня $t_v = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (житловий будинок) [6]. Дослідження виконувалися для цегляної стіни, утепленої шаром мінеральної вати щільністю $\rho_0 = 125\text{ кг/м}^3$. Витрати матеріалів визначалися на 1 м висоти стіни.

Перетин зовнішньої стіни наведено на рис. 1. Теплопровідність шарів огорожувальної конструкції наведено у табл. 1. Нумерація шарів – від внутрішньої поверхні огороження.



Рис. 1. Перетин зовнішньої стіни

Таблиця 1

Характеристика шарів огорожувальної конструкції

№	Найменування	Теплопровідність, Вт/(м · К)
1	Вапняно-піщаний розчин	0,81
2	Цегла	0,81
3	Клейова суміш	0,93
4	Утеплювач	0,045
5	Шар опорядження	0,93

За теплотехнічним розрахунком товщина утеплювача становить 0,13 м.

Розміри розрахункової схеми наведено на рис. 2.

Визначення величини теплового потоку, мінімальної температури на внутрішній поверхні стіни та приведеного

опору теплопередачі виконувалося з використанням розрахунків температурних полів. Температурне поле розрахункової ділянки стіни без заокруглення наведено на рис. 3.

Результати розрахунку температурного поля за рис. 3 наведено у табл. 2.

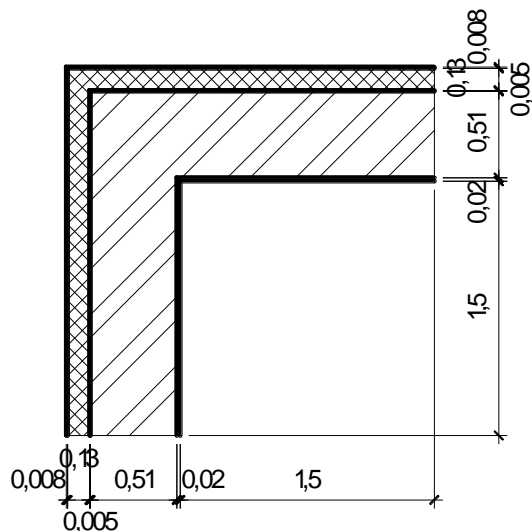


Рис. 2. Розміри розрахункової схеми

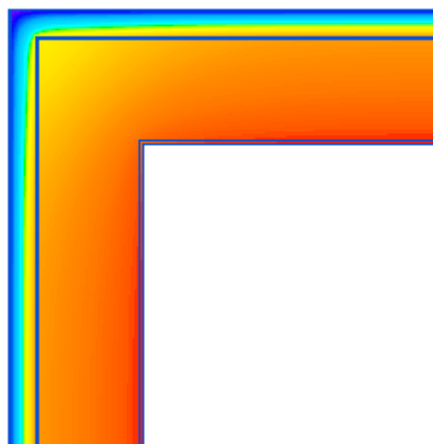


Рис. 3. Температурне поле розрахункової ділянки стіни без заокруглення

Таблиця 2

Результати розрахунку температурного поля розрахункової ділянки стіни без заокруглення зовнішньої поверхні стіни

Показник	Одиниця вимірювання	Кількість
Тепловий потік, що проходить крізь розрахункову ділянку кута зовнішньої стіни	Вт	35,331
Мінімальна температура на внутрішній поверхні стіни	°С	16,1
Приведений опір теплопередачі	м ² · К/Вт	2,757
Товщина утеплювача	м	0,13
Зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення	м ²	0
Витрати цегли	м ³	1,8105
Витрати утеплювача	м ³	0,546

Як видно з табл. 2, приведений опір теплопередачі розрахункової ділянки стіни $R_{\Sigma} = 2,754 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ менше нормованого для I-ї температурної зони $R_{q \text{ min}} = 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [6]. Необхідно збільшити товщину утеплювача. Щоб всі

варіанти заокруглення стіни були рівноцінні (з близьким значенням приведенного опору теплопередачі огороження), товщину утеплювача всіх варіантів визначаємо з точністю до 1 мм.

Після збільшення товщини утеплювача до 0,167 м приведений опір теплопередачі розрахункової ділянки стіни $R_{\Sigma} = 3,307 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ став більше нормованого $R_{q \text{ min}} = 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. Результати

розрахунку температурного поля розрахункової ділянки стіни без заокруглення після збільшення товщини утеплювача до 0,167 м наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку температурного поля розрахункової ділянки стіни без заокруглення після збільшення товщини утеплювача до 0,167 м

Показник	Одиниця вимірювання	Кількість
Тепловий потік, що проходить крізь розрахункову ділянку кута зовнішньої стіни	Вт	38,106
Мінімальна температура на внутрішній поверхні стіни	°С	16,7
Приведений опір теплопередачі	$\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	3,307
Товщина утеплювача	м	0,167
Зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення	м^2	0
Витрати цегли	м^3	1,8105
Витрати утеплювача	м^3	0,7076

У подальших дослідженнях товщина утеплювача для кожного варіанта заокруглення зовнішньої поверхні стіни приймалася такою, щоб виконувалася вимога $R_{\Sigma} \geq R_{q \text{ min}}$. Заокруглення зовнішньої поверхні стіни приймалося радіусом 0,5, 1, 1,5, 2 м.

Температурні поля для кожного варіанта заокруглення зовнішньої поверхні стіни наведено на рис. 4.

Результати розрахунків температурних полів варіантів з заокругленням зовнішньої поверхні стіни наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунку температурних полів варіантів з заокругленням зовнішньої поверхні стіни

Показник	Одиниця вимірювання	Кількість при радіусі заокруглення зовнішньої поверхні стіни, м			
		0,5	1	1,5	2
Тепловий потік, що проходить крізь розрахункову ділянку кута зовнішньої стіни	Вт	38,029	36,454	33,815	31,172
Мінімальна температура на внутрішній поверхні стіни	°С	16,7	17,7	17,2	18,4
Приведений опір теплопередачі	$\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	3,313	3,313	3,308	3,301
Товщина утеплювача	м	0,165	0,167	0,172	0,177
Зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення	м^2	0	0,019	0,1322	0,3516
Витрати цегли	м^3	1,7889	1,6868	1,5785	1,4701
Витрати утеплювача	м^3	0,6674	0,6425	0,6258	0,6071

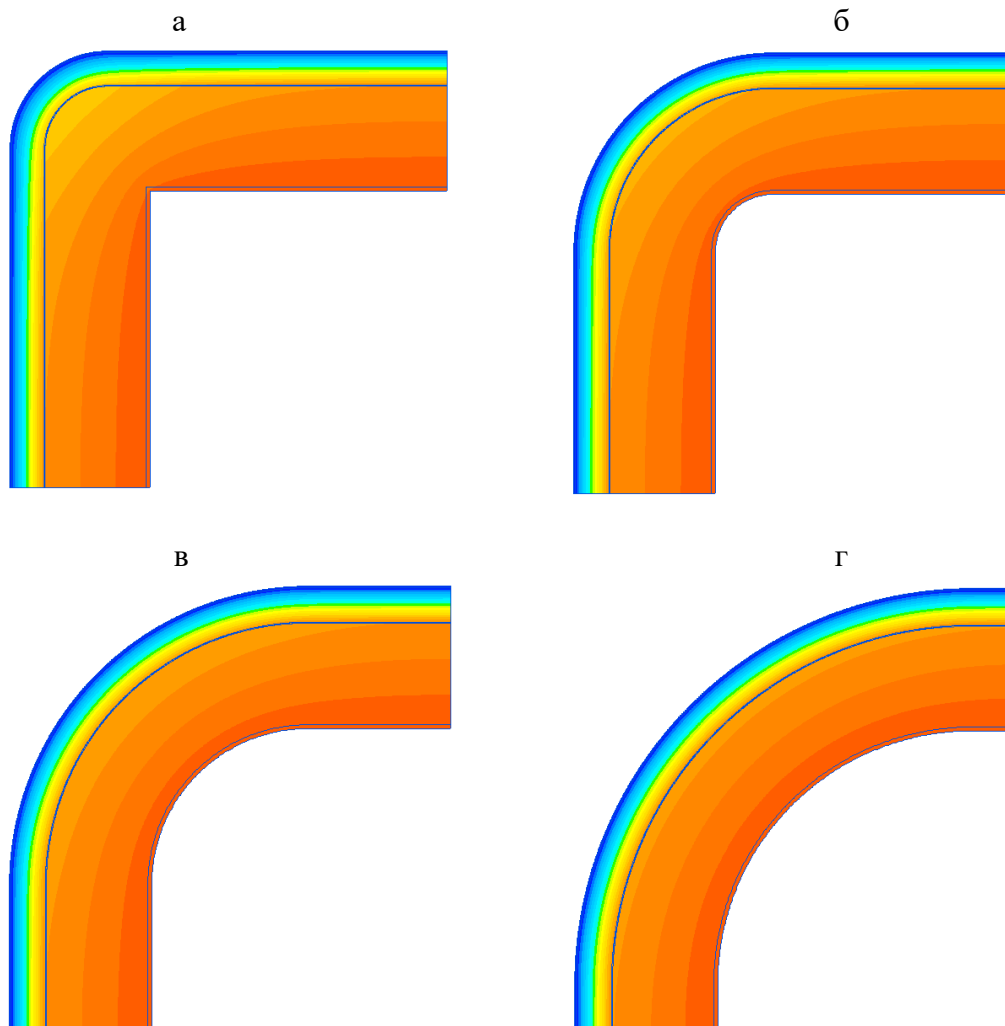


Рис. 4. Температурні поля при радіусі заокруглення зовнішньої поверхні стіни:
а – 0,5 м; б – 1 м; в – 1,5 м; г – 2 м

На рис. 5 наведено графіки залежності теплового потоку, що проходить крізь розрахункову ділянку зовнішнього кута стіни, витрати цегли та утеплювача у межах розрахункової ділянки і величини зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення стіни від радіуса заокруглення зовнішньої поверхні стіни.

Як видно з графіків на рис. 5, інтенсивне зменшення теплового потоку, що проходить крізь розрахункову ділянку, відбувається при радіусі заокруглення

зовнішньої поверхні стіни 0,9 м та більше. Незначне зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення стіни відбувається до радіуса заокруглення 1,4 м. Інтенсивне зменшення об'єму цегли в межах розрахункової ділянки відбувається при радіусі заокруглення більше 0,8 м. Аналогічно для мінеральної вати до 0,7 м. Аналіз графіків показав, що оптимальним радіусом заокруглення зовнішньої поверхні стіни при врахуванні всіх показників є 0,8 м.

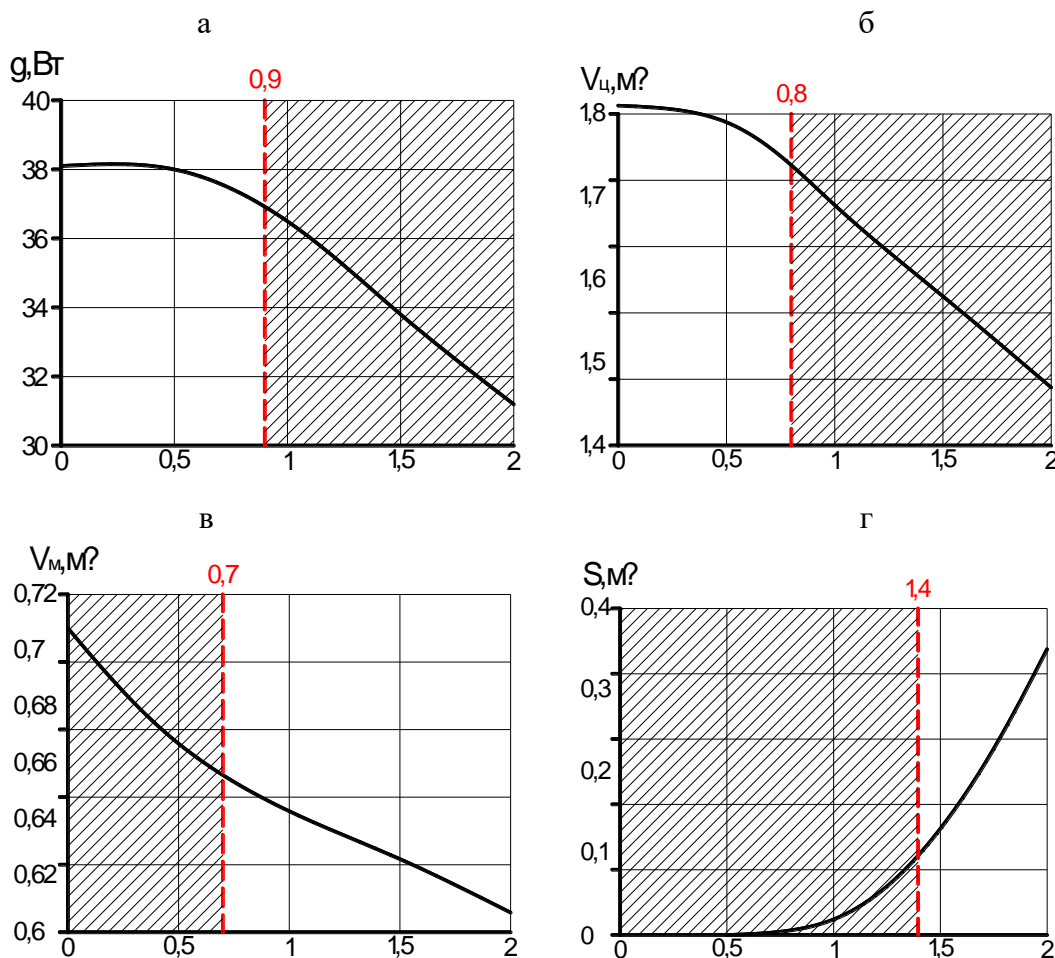


Рис. 5. Графіки залежності радіуса заокруглення зовнішньої поверхні стіни від: а – теплового потоку, що проходить крізь розрахункову ділянку зовнішнього кута стіни; б – витрати цегли у межах розрахункової ділянки; в – витрати утеплювача у межах розрахункової ділянки; г – величини зменшення площі кімнати внаслідок заокруглення стіни

Висновки. Заокруглення зовнішньої поверхні кута зовнішньої стіни є одним зі способів підвищення теплозахисних властивостей ділянки кута. Проведені дослідження дають змогу визначити оптимальний радіус заокруглення кута, що,

у свою чергу, підвищить теплозахисні властивості кута та знизить коефіцієнт теплопередачі трансмісією зовнішньої огорожувальної конструкції будівлі в цілому.

Список використаних джерел

1. Прищенко А. М. Узлові з'єднання зовнішніх стін з підвищеними теплотехнічними показниками як засіб забезпечення енергоефективності будівель: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Київ, 2015. 29 с.
2. Yurin O., Galinska T. Study of heat shielding qualities of brick wall angle with additional insulation located on the outside fences. *MATEC Web of Conferences*. Transbud – 2017: Structure, Materials and Infrastructure. 2017. Vol. 116. P. 02039. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602039> (last access: 28.05.2021).

3. Yurin Oleg, Azizova Anna, Galinska Tatyana. Study of heat shielding qualities of a brick wall corner with additional insulation on the brick. *MATEC Web of Conferences*. Transbud – 2018. 2018. Vol. 230. P. 02039. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002039> (last access: 28.05.2021).
4. Юрін О. І., Семко О. В. Вплив взаємного розташування зовнішнього кута будинку та віконного прорізу на температуру внутрішньої поверхні кута. *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]*. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. 2013. Вип. 4(2). С. 182–190.
5. Samsonova Maria, Semenova Elvira, Kotova Christina, Salogub Leonid. Additional heat loss of jamb in enclosing structures. *E3S Web of Conferences*. 2021. 263:03017 URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126303017> (last access: 28.05.2021).
6. Fořt J., Pavlík Z., Jerman M., Černý R. Evaluation of thermal performance of window lintel construction detail. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018. 415(1):012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/415/1/012015> (last access: 28.05.2021).
7. Belash T. A., Kuznetsov A. V. Energy Efficient Wall Enclosing Structures. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018. 463(3):032052. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032052> (last access: 28.05.2021).
8. Farenjuk Gennadiy, Filonenko Olena, Datsenko Volodymyr. Research on Calculation Methods of Building Envelope Thermal Characteristics. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 8, № 4.8. P. 97–102.
9. Landerheinecke K., Gany P., Satter E. *Thermodynamik für Ingenieuren*. Viewegs Fachbücher Der Technik, 2003. 336 p.
10. ДБН В.2.6-31:2016. Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель. Чинні від 2016-08-07. Київ: Мінрегіон України, 2016. 30 с.

Семко Володимир Олександрович, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва Центральноукраїнського національного технічного університету. ORCID iD: 0000-0003-2438-0135. E-mail: semko.vladimir@gmail.com.

Юрін Олег Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-9290-9048. E-mail: yurinoleg54@gmail.com.

Магас Наталія Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-4459-3704. Тел.: +38 (050) 024-15-31. E-mail: magasnataliya@gmail.com.

Норка Анастасія Русланівна, студентка, група 401БП Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-0294-8802. E-mail: norka11anastasiy@gmail.com.

Пилипенко Євген Едуардович, студент, група 401БМ Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-6367-4753. E-mail: Jeka0097@ukr.net.

Semko Volodymyr, Dr. Sc. (Tech.), professor, Department of Construction, Road Machinery and Construction, Central Ukrainian National Technical University. ORCID iD: 0000-0003-2438-0135. E-mail: semko.vladimir@gmail.com.

Yurin Oleg, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Construction and Civil Engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-9290-9048. E-mail: yurinoleg54@gmail.com.

Mahas Natliia, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Construction and Civil Engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-4459-3704. Тел.: +38 (050) 024-15-31. E-mail: magasnataliya@gmail.com.

Norka Anastasiia, student, Group 401BP, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-0294-8802. E-mail: norka11anastasiy@gmail.com.

Pylypenko Yevhen, student, Group 401BM, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-6367-4753. E-mail: Jeka0097@ukr.net.

Статтю прийнято 26.05.2021 р.

УДК 691.32; 691.57

ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ БЕТОНУ ВІД СУЛЬФАТНИХ СЕРЕДОВИЩ

Доктори техн. наук П. В. Кривенко, І. І. Руденко,
канд. техн. наук О. П. Константиновський

COATING FOR PROTECTION OF CONCRETE FROM SULFATES

D. Sc. (Tech.) P. V. Krivenko, D. Sc. (Tech.) I. I. Rudenko, PhD (Tech.) O. P. Konstantynovskiy

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241663>

Анотація. Запропоновано захисне покриття на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого для обмеження транспорту іонів SO_4^{2-} з сульфатних середовищ у структуру бетону як засіб забезпечення пасивного стану сталеві арматури. Показано, що захисне покриття товщиною 3 мм забезпечує повний захист бетону від проникнення сульфатів. При цьому виявлено залежність проникності сульфатів від катіону, яка зменшується в ряду $(NH_4)_2SO_4 > Na_2SO_4 > MgSO_4$. За допомогою методів фізико-хімічного аналізу показано, що обмеження транспорту сульфат-іонів захисним покриттям обумовлено їх зв'язуванням лужною алюмосилікатною матрицею в цеолітоподібні новоутворення з додатковим підвищенням їх кристалічності в присутності катіонів Na^+ , NH_4^+ та Mg^{2+} сульфатних солей.

Ключові слова: захисне покриття, лужне алюмосилікатне зв'язуюче, сульфатне середовище, корозія сталеві арматури, цеолітоподібні гідроалюмосилікати, оклюдування.

Abstract. Durability of reinforced concrete is one of the main demands in civil engineering. Operating conditions, particularly in aggressive mediums, determine durability of constructions. Sulfate mediums are among the most aggressive ones which cause steel reinforcement corrosion. The modern requirements for high consistency fresh concretes are governed by practice. This way the disturbance of reinforcement passive state can be caused by changes in hardened concrete especially in aggressive mediums. Thus, the restriction of SO_4^{2-} ions transport in concretes, which are obtained from high consistency fresh mixes and exploited in sulfate mediums, can be considered as an actual problem.

The paper is devoted to protection of concrete surface by coating based on alkali-activated aluminosilicate binder from SO_4^{2-} ions transport to prevent steel reinforcement corrosion. It was shown that the coating with thickness of 3 mm ensures total concrete protection. It was revealed that permeability of concrete depending on cation decreases in the row $(NH_4)_2SO_4 > Na_2SO_4 > MgSO_4$. The protective function of coating was simulated by application of mentioned salts as admixtures. Less pH values of water extracts of the binder during hydration while using of 2.5 % $MgSO_4$ is evidence of advanced crystallinity of zeolite-like sulfate-containing hydroaluminosilicates with participation of Mg^{2+} ions equal to Ca^{2+} ions. While content of $(NH_4)_2SO_4$ was increased up to 5.0 % less pH was fixed due to decelerated formation of zeolite-like minerals. Stability of pH values in presence of Na_2SO_4 (0.5...2.5 %) was caused by no influence on structure formation. Thus, the restriction of SO_4^{2-} ions transport in protective coating is due to their binding by alkaline aluminosilicate binder in zeolite-like minerals with higher crystallinity due to presence of Na^+ , NH_4^+ and Mg^{2+} cations from sulfates.

Keywords: protection coating, alkali-activated aluminosilicate binder, sulfate medium, steel reinforcement corrosion, zeolite-like hydroaluminosilicates, occlusion.

Вступ. Забезпечення довговічності залізобетонних конструкцій є однією з головних вимог сучасного будівельного виробництва. Одним з факторів, який визначає довговічність таких конструкцій, є умови їх експлуатації, зокрема вплив агресивних середовищ. Найбільшого руйнівного впливу зазнають будівельні конструкції хімічної та енергетичної галузей промисловості, морські порти, фундаменти мостів та тунелі [1–3] тощо. В агресивних умовах експлуатуються системи каналізації та водовідведення мостів та мегаполісів [4]. Наразі 75 % будівельних конструкцій зазнають руйнівного впливу агресивних середовищ [5].

Одними із найпоширеніших та найагресивніших середовищ, які призводять до корозії сталевий арматури в бетоні, є сульфатні. Це обумовлено наявністю сульфатів практично в усіх видах природних і стічних вод [6]. Показано, що глибина проникнення сульфат-іонів з агресивних середовищ у структуру бетону визначається катіоном сульфатної солі [7]. Сульфат-іони хоча і не призводять до прямої депасивації сталі, однак визначають формування сірководню (H_2S) і є каталізаторами процесу окиснення (карбонізації) гідратних новоутворень в'язучих речовин. Очевидно, що при цьому спостерігається зниження значень показника рН порового розчину, який розглядається як основний фактор стійкості пасивуючої плівки на поверхні сталі [8].

Сучасна практика будівництва висуває дедалі вищі вимоги щодо технологічності бетонних сумішей. Виконання цих вимог викликає необхідність у високорухомих бетонних сумішах, що обумовлює зміни в структурі бетону, які можуть спричинювати порушення пасивного стану сталевий арматури, особливо в умовах дії агресивних середовищ. Вказане обумовлює необхідність обмеження транспорту SO_4^{2-} -іонів у структуру бетонів, що отримані з таких сумішей і функціонують в умовах дії сульфатів [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обмеження транспорту сульфат-іонів у структуру залізобетонних конструкцій може здійснюватись за рахунок їх зв'язування продуктами гідратації цементів. Здатністю до зв'язування характеризуються гідратні новоутворення портландцементів – гідросилікатний C–S–H та гідроалюмосилікатний C–A–S–H гель [10]. Хімічне зв'язування сульфат-іонів можливо також за участю трикальційалюмінату (C_3A) і чотирікальційалюмофериту (C_4AF) в комплексні сполуки, відомі під загальною назвою AFm (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -mono) фази, які здатні залучати різні аніони [11].

Підвищення довговічності залізобетонних конструкцій можливо при використанні цементів, які містять гранульований доменний шлак (далі – ГДШ) і виробництво яких відповідає сучасним тенденціям розвитку цементної промисловості [12]. Екологічний ефект від використання шлакових цементів обумовлений зниженням емісії CO_2 за рахунок використання побічних продуктів і відходів виробництва [13]. При збільшенні вмісту ГДШ у складі цементу утворення AFm фаз у продуктах гідратації збільшується, зважаючи на підвищення вмісту Al_2O_3 в системі [14]. Це пояснюється більшою зв'язуючою здатністю AFm фаз порівняно з гідросилікатами кальцію [15].

Найбільш перспективними, з огляду на довговічність залізобетонних конструкцій в агресивних сульфатних середовищах, є шлаколужні цементы (далі – ШЛЦ) [16]. Зв'язування SO_4^{2-} -іонів у ШЛЦ здійснюється як гідросилікатним C–S–H та гідроалюмосилікатним C–A–S–H гелями, так і лужними гідроалюмосилікатами, які за складом є аналогами природних цеолітів [17]. Відомим є також спосіб зниження вмісту агресивних до сталевий арматури іонів у поровому розчині ШЛЦ шляхом їх зв'язування AFm-фазами, направлено синтезованими у фазовому складі гідратів [18].

Ще одним заходом щодо обмеження транспорту сульфат-іонів у структуру бетону є ущільнення структури при використанні водоредукуючих поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) [9]. Наразі найбільш ефективними для портландцементних систем водоредукуючими добавками є ПАР на основі складних поліефірів [19]. Однак збільшення в складі цементу шлакової складової призводить до зменшення [20] або до повної втрати ефективності ПАР вказаної хімічної природи в ШЛЦ [21]. Запропоновані принципи обґрунтованого вибору молекулярної будови ПАР та комплексних добавок на їх основі різного функціонального призначення для ШЛЦ бетонів [22].

Вказані засоби обмеження транспорту сульфат-іонів у структуру залізобетону мають враховуватися і комплексно застосовуватися при зведенні споруд. Однак для захисту вже збудованих споруд використовуються захисні покриття, які запобігають проникненню (транспорту) агресивних іонів у структуру бетону та забезпечують пасивний стан сталеві арматури. Розрізняють різні види захисних покриттів: для покриття поверхні бетону; герметики пенетруючої дії, які забезпечують ущільнення порової структури; просочувальні [9]. Наприклад, у ШЛЦ бетонах для просочування можуть використовуватися водні розчини хлоридів, нітратів та сульфатів лужноземельних металів (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+}), які зв'язують вільний луг у нерозчинні з'єднання, що сприяє ущільненню та підвищенню непроникності цементного каменю [23].

Відомим є використання неорганічних захисних покриттів на основі лужних в'язучих речовин для запобігання транспорту агресивних іонів у структуру бетону і забезпечення тим самим пасивного стану сталеві арматури [24]. Науковою школою НДІВМ ім. В. Д. Глуховського запропоновано захисні покриття на основі

лужного алюмосилікатного зв'язуючого, підвищена довговічність яких обумовлена формуванням у складі продуктів гідратації новоутворень, які за складом є аналогами природних мінералів типу цеолітів та фельдшпатоїдів [16]. Використання лужного алюмосилікатного зв'язуючого формули $(0.8Na_2O+0.2K_2O) \cdot Al_2O_3 \cdot 4.5SiO_2 \cdot nH_2O$ (де R – Na, K) як основи захисного покриття забезпечує формування високих експлуатаційних властивостей, водостійкість та довговічність, які обумовлені утворенням гідратних новоутворень у вигляді гейландит-Na і гейландит-K ($Na_6Si_{27}Al_{36}O_{72} \cdot 24H_2O$ і $K_6Si_{27}Al_{36}O_{72} \cdot 24H_2O$ відповідно), філіпсіт ($3Al_6Si_{10}O_{32} \cdot 12H_2O$), шабазит ($Al_2Si_4O_{12} \cdot 6H_2O$) і фожазит ($(Na_2, Ca, Mg)_{3.5}(Al_7Si_{17}O_{48}) \cdot 32(H_2O)$) [25]. Необхідний напрямок в структуроутворенні забезпечується при співвідношенні оксидів у системі $SiO_2/Al_2O_3 = 4.5$ та $R_2O/Al_2O_3 = 1.0$ [26].

Можна передбачити, що при взаємодії такого покриття з сульфатними середовищами SO_4^{2-} -іони будуть зв'язуватись цеолітоподібними новоутвореннями, що сприятиме обмеженню їх проникнення в захищений бетон.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження можливості захисту бетону, який експлуатується в сильноагресивних сульфатних середовищах, покриттям на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого.

Для досягнення мети вирішувалися такі задачі:

- дослідити залежність транспортних властивостей бетону від товщини захисного покриття та катіону сульфатного середовища;

- обґрунтувати стійкість захисного покриття на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого в сульфатних середовищах з точки зору зв'язування іонів SO_4^{2-} .

Сировинні матеріали. Основу покриття подано лужним алюмосилікатним зв'язуючим загальної формули $(0.8\text{Na}_2\text{O}+0.2\text{K}_2\text{O})\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4.5\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Як інгредієнти алюмосилікатної складової зв'язуючого використано:

- метакаолін (Дерманківське родовище, Україна) (вміст оксидів, %: $\text{CaO} - 0.27$, $\text{SiO}_2 - 53.67$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 43.61$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.77$, $\text{Na}_2\text{O} - 0.25$; в.п.п. – 0.50 %), питома поверхня $S_{\text{пит}} = 800 \text{ м}^2/\text{кг}$ (за Блейном);

- трепел (Коноплянське родовище, Україна) (вміст оксидів, %: $\text{CaO} - 0.86$, $\text{SiO}_2 - 88.40$, $\text{TiO}_2 - 2.10$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 6.40$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 3.25$, $\text{MgO} - 0.98$, $\text{Na}_2\text{O} - 0.69$, $\text{SO}_3 - 0.40$; в.п.п. – 0.20 %), питома поверхня $S_{\text{пит}} = 800 \text{ м}^2/\text{кг}$ (за Блейном);

- зола-винесення (Ладижинська ТЕЦ, Україна) (вміст оксидів, %: $\text{CaO} - 2.86$, $\text{SiO}_2 - 50.94$, $\text{TiO}_2 - 0.94$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 24.56$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 13.25$, $\text{MgO} - 1.98$, $\text{Na}_2\text{O} - 0.69$, $\text{SO}_3 - 0.40$; в.п.п. – 1.64 %), фракція $\leq 0,16 \text{ мм}$.

Лужний компонент зв'язуючого подано натрієвим рідким склом з силікатним модулем $M_c = 2.8$ і густиною $1430 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Як наповнювачі використано піски кварцові фракцій $0...0,315 \text{ мм}$ та $0,315...0,63 \text{ мм}$.

Як добавки (дозування у відсотках від маси лужного алюмосилікатного зв'язуючого) використано:

- тринатрійфосфат натрію $\text{Na}_3\text{PO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (2.0 %) згідно з CAS № 7601-54-9;

- глюконат натрію (1.0 %) згідно з CAS № 527-07-1.

Водоутримувальну здатність при необхідній консистенції розчинової суміші забезпечено карбоксиметилцелюлозою («Gabrosa HV» AkzoNobel, Нідерланди), витрата 0,1 % від маси матеріалу покриття.

Методи досліджень. Окремо готували рідку та суху частину розчинової суміші лужного алюмосилікатного покриття. Рідка частина (лужний розчин) складається з рідкого натрієвого скла та води; суха частина – усі сухі компоненти

зв'язуючого та наповнювачі. Після приготування рідкої та сухої частини матеріалу їх ретельно сумісно перемішували за допомогою змішувача типу НОВАРТ.

Для визначення ефективності захисне покриття наносили на бокові поверхні зразків дрібнозернистого бетону $40\times 40\times 160 \text{ мм}$ (портландцемент:пісок – 1:3, $V/\Pi = 0.5$).

Ефективність захисного покриття в залежності від його товщини оцінювали за глибиною проникнення сульфат-іонів з агресивного середовища.

Покриття наносили на бокові поверхні затверділих зразків бетону різним шаром (1, 2, 3 мм) та витримували впродовж 28 діб за умов $t = 20\pm 2^\circ\text{C}$ та $W = 60\pm 5\%$. Після цього зразки, як захищені покриттям, так і незахищені (для порівняння), розміщали в вертикальному положенні в воді (контрольні) та в водних розчинах сульфатів натрію, магнію та амонію (концентрація в перерахунку на $\text{SO}_4^{2-} - 30000 \text{ мг}/\text{л}$). За концентрацією сульфат-іонів вказані середовища відповідають, згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008, найбільш високому класу хімічної агресії – ХА3.

Для визначення проникнення сульфат-іонів з агресивного середовища зразки бетону після витримання впродовж 360 діб в агресивних розчинах розрізали. Глибину проникнення приймали ту, на якій за допомогою електронно-зондового аналізу виявляли групи SO_3 .

Для моделювання роботи захисного покриття під впливом сульфатних середовищ досліджено зміни показника рН водних витяжок лужного алюмосилікатного зв'язуючого з добавками сульфатів впродовж перших 4 год гідратації. Вимірювання здійснювали за допомогою лабораторного приладу «EZODO PL-700AL» для аналізу параметрів води.

Зондовий аналіз здійснювали на растровому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі РЕММА 102-02.

Основна частина дослідження. На рис. 1 показано вплив виду агресивного

середовища на бетон за глибиною проникнення сульфат-іонів. Виявлено, що незахищений бетон у залежності від катіону солі характеризується глибиною проникнення сульфат-іонів у межах 5.8...7.6 мм, натомість захищений – 0.1...1.5 мм в залежності від товщини шару покриття. Покриття товщиною 1 мм визначає обмеження глибини проникнення до 1,3...1,5 мм. Збільшення товщини покриття до 3 мм практично унеможливило транспорт сульфат-іонів у структуру бетону, що підтверджують результати зондового

аналізу. Так, вміст сульфатів на глибині 0,1 мм зразків незахищеного бетону в перерахунку на SO₃ становив 4.0 % (рис. 2), захищеного покриттям товщиною 3 мм – 0.0 % (рис. 3).

Згідно з результатами дослідження, спостерігається закономірність у зменшенні проникності захищеного бетону щодо сульфат-іонів у ряду (NH₄)₂SO₄>Na₂SO₄>MgSO₄, яка пояснюється хімічною активністю катіону цих солей.

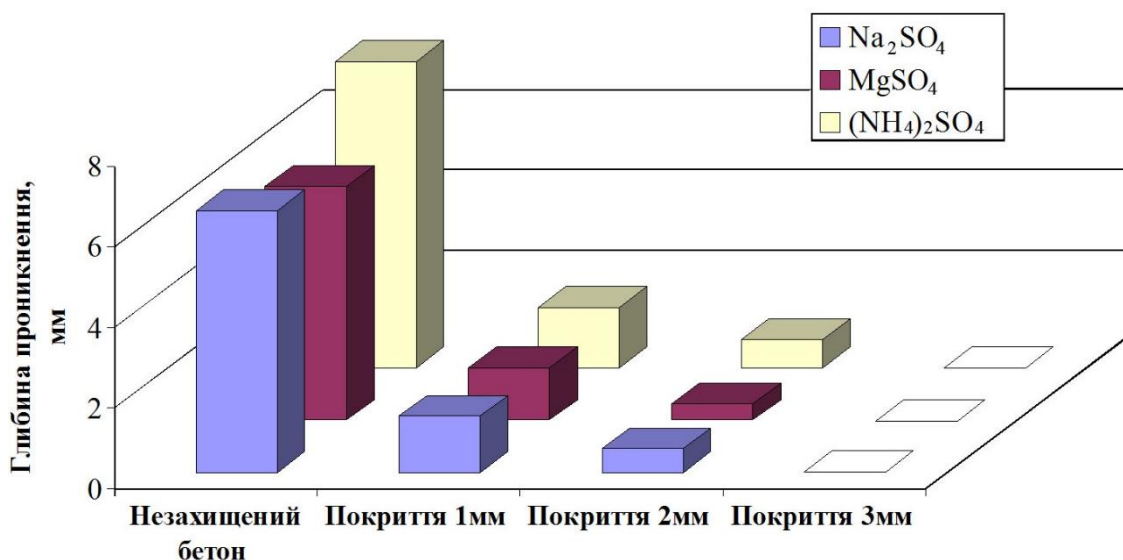


Рис. 1. Глибина проникнення сульфатів у бетон після 360 діб

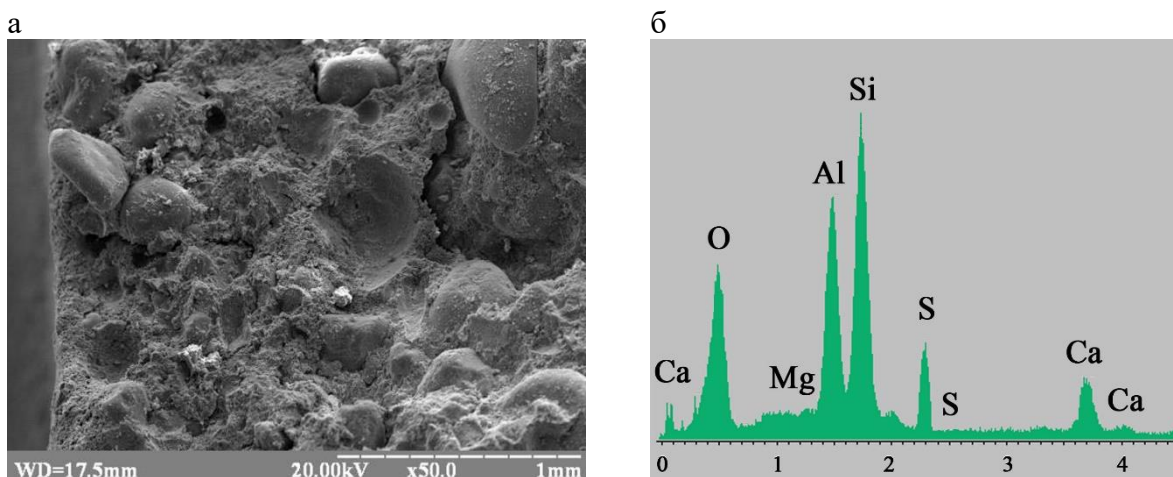


Рис. 2. Електронні мікрофотографії поверхні сколу (а) і зондовий аналіз (б) зразка незахищеного бетону після витримування впродовж 360 діб у розчині сульфату натрію

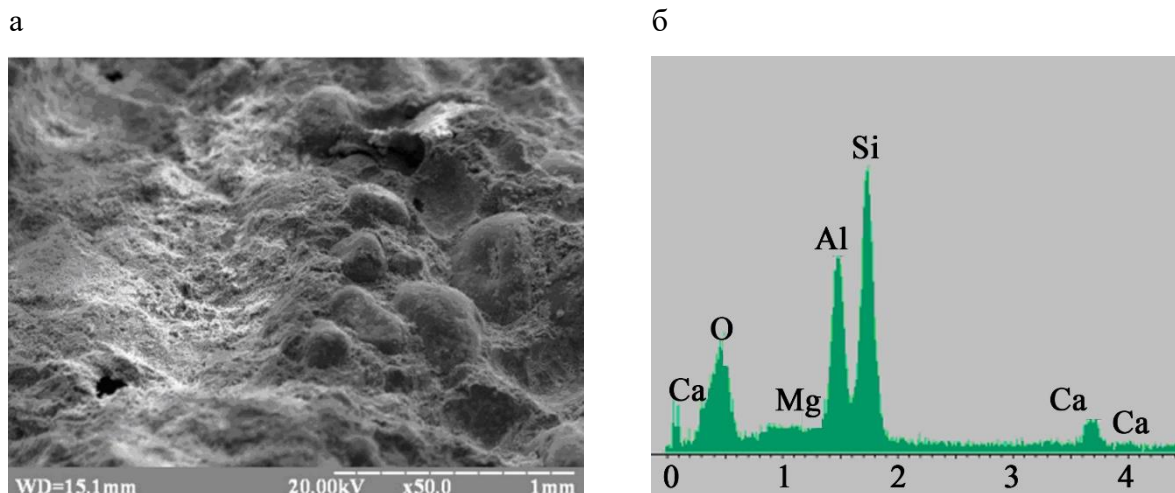


Рис. 3. Електронні мікрофотографії поверхні сколу (а) і зондовий аналіз (б) зразка захищеного бетону (товщина покриття – 3.0 мм) після витримування впродовж 360 діб у розчині сульфату натрію

За зміною показника рН водних витяжок лужного алюмосилікатного зв'язуючого підтверджено зв'язування іонів SO_4^{2-} , NH_4^+ , Mg^{2+} в структурі цеолітоподібних новоутворень при взаємодії сульфатного середовища з захисним покриттям на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого (рис. 4).

Так, наприклад, добавка солі MgSO_4 при витраті на рівні 2.5 % визначає зменшення показника рН у порівнянні з контрольним складом (рис. 4, а). Це свідчить про інтенсифікацію процесів гідратації лужного алюмосилікатного зв'язуючого і кристалізацію цеолітоподібних гідроалюмосилікатів за нормальних температур. Іони Mg^{2+} на рівні з іонами Ca^{2+} беруть участь у їх формуванні із зв'язуванням сульфат-іонів. Тенденція до зменшення значень рН у випадку добавки $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ простежується вже при витраті на рівні 5 %, що свідчить про перебіг структуроутворення в тому ж напрямку, але з сповільненням з огляду на меншу концентрацію в системі лужно-земельних металів і формуванням інших типів цеолітоподібних структур (рис. 4, б). Добавка Na_2SO_4 практично не змінює

інтенсивність структуроутворення з огляду на відсутність катіонного обміну, про що свідчить стабільність значень показника рН (рис. 4, в).

Стійкість запропонованого покриття в сульфатних середовищах може бути обґрунтована формуванням цеолітоподібних новоутворень, які містять іони SO_4^{2-} , NH_4^+ , Mg^{2+} . Так, обмін аніонів OH^- на аніони SO_4^{2-} може призводити до утворення таких мінералів, як канкриніт $(\text{Na,Ca})_8(\text{Al}_6\text{Si}_6)\text{O}_{24}(\text{CO}_3,\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, б'якелайт $(\text{Na,Ca,K})_8(\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{0.5} \cdot \text{H}_2\text{O}$, франциніт $(\text{Na,K})_6\text{Ca}_2(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ тощо. У свою чергу, обмін катіонів Na^+ на катіони NH_4^+ або Mg^{2+} може призводити до синтезу таких фаз як гейландит- NH_4 $[(\text{NH}_4)_2\text{Ca}]_2\text{Al}_4\text{Si}_{14}\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, шабазит- Na $[(\text{NH}_4)_2\text{Ca}]\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, томсоніт- NH_4 $(\text{Na,NH}_4)\text{Ca}_2[\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, фожазит- Mg $(\text{Mg,Na}_2,\text{Ca})_{3.5}[\text{Al}_7\text{Si}_{17}\text{O}_{48}] \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, шабазит- Mg $(\text{Mg}_{0.7}\text{K}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Na}_{0.1})[\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, фер'єрит- Mg $(\text{Mg,Na}_2,\text{K}_2,\text{Ca})_{3.5}\text{Mg}[\text{Al}_{5-7}\text{Si}_{27.5-31}\text{O}_{72}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ [27].

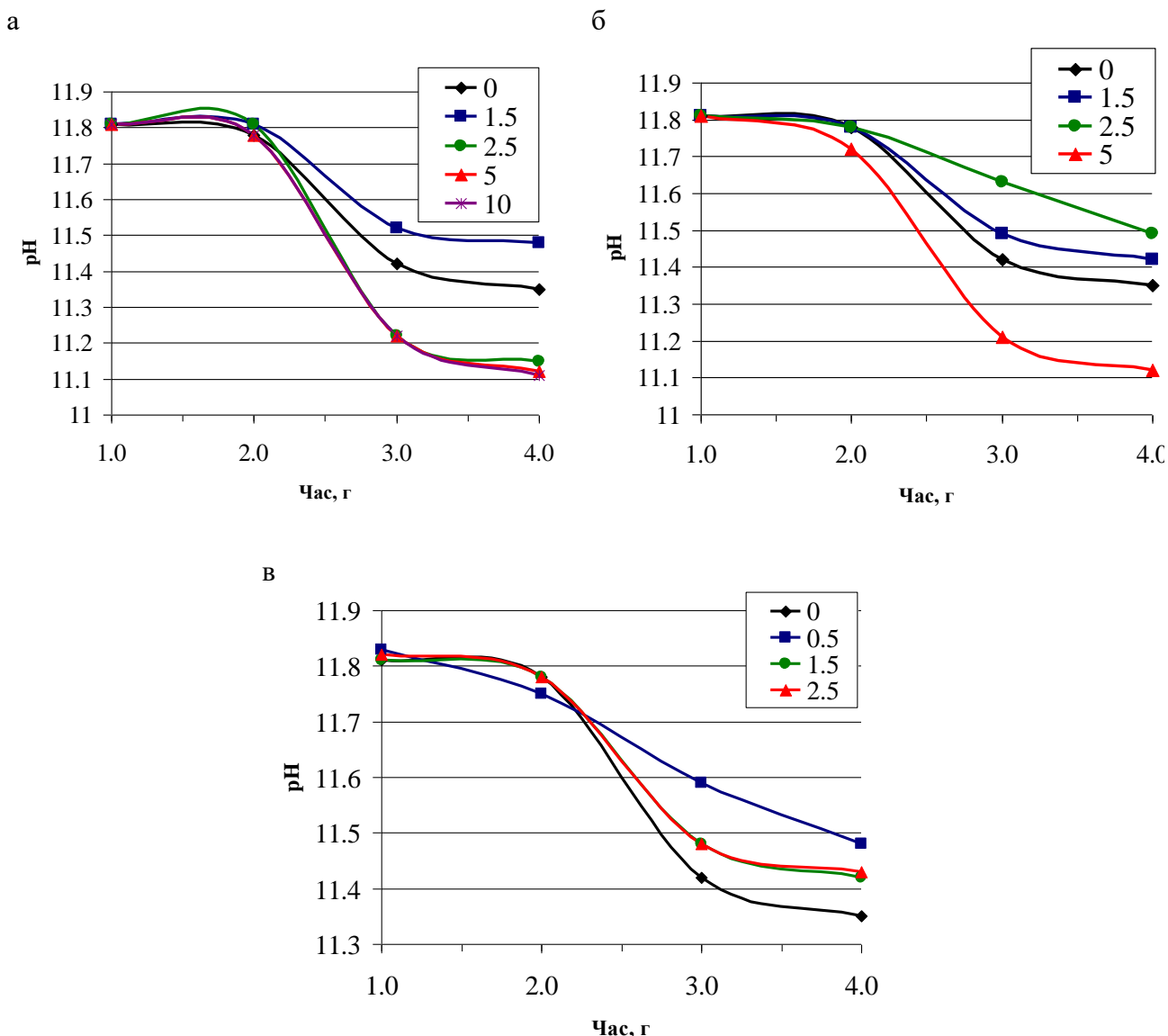


Рис. 4. Вплив вмісту добавок $MgSO_4$ (а), $(NH_4)_2SO_4$ (б) і Na_2SO_4 (в) на зміну рН водних витяжок лужного алюмосилікатного зв'язуючого в часі

Обмеження транспорту іонів SO_4^{2-} обумовлено не тільки їх зв'язуванням в цеолітоподібні новоутворення, а і з додатковим підвищенням ступеня кристалізації в присутності катіонів NH_4^+ , Mg^{2+} , що підтверджується результатами електронної мікроскопії (рис. 5).

Проведено дослідно-промислове впровадження розроблених захисних покриттів при виконанні будівельних робіт з реконструкції корпусу Києво-Печерської

Лаври для захисту від корозії ростверків підсилення, які зазнавали впливу сульфатного середовища класу ХА3 (рис. 6). В результаті обстеження виявлено, що стан покриття (повнота затвердіння, відсутність тріщин, слідів підтікання, сторонніх включень тощо) та його експлуатаційні властивості (міцність зчеплення з бетоном) відповідають вимогам національних стандартів України [28, 29].

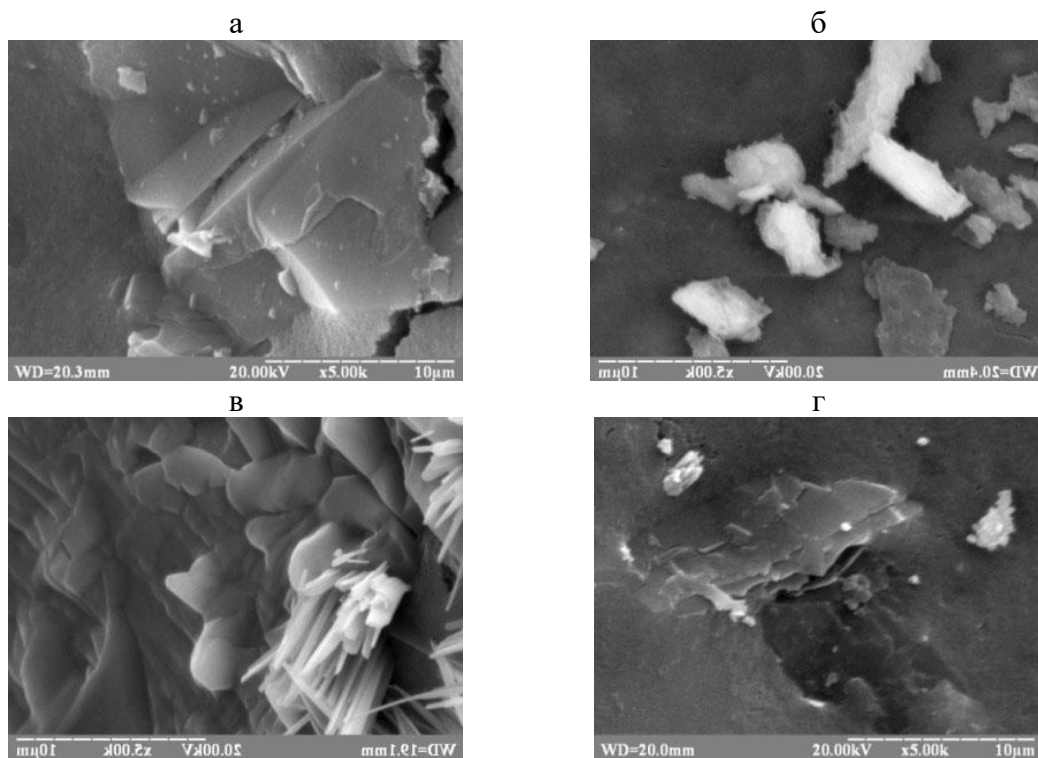


Рис. 5. Електронні мікрофотографії поверхні сколу зразків лужного алюмосилікатного зв'язуючого немодифікованого (а) та модифікованого добавками 2.5 % сульфату магнію (б), амонію (в) та натрію (г) після тверднення впродовж 180 діб у нормальних умовах



Рис. 6. Фотографії поверхні бетону ростверка: а, в – до нанесення захисного покриття; б, г – захищеного покриттям

Висновки

1. Захист бетону, який експлуатується в сильноагресивних сульфатних середовищах, від транспорту сульфат-іонів забезпечується нанесенням покриття на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого.

2. Повний захист бетону забезпечується покриттям товщиною 3 мм при зменшенні транспортних властивостей щодо сульфатів у ряду $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgSO}_4$.

3. Обмеження транспорту іонів SO_4^{2-} обумовлено як їх зв'язуванням у цеолітоподібні новоутворення з додатковим

підвищенням ступеня кристалізації в присутності катіонів Na^+ , NH_4^+ та Mg^{2+} , так і їх оклюдуванням у вже сформованій структурі захисного покриття.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, яка виконується в рамках бюджетного фінансування № 1020U001010, а також за розвиток теми досліджень за програмою наукового співробітництва COST Action CA15202 SARCOS «Self-Healing concrete: the path to sustainable construction», яка діє в рамках проекту європейського рівня HORIZON 2020, http://www.cost.eu/COST_Actions/ca/CA15202.

Список використаних джерел

1. Kitsutaka Y., Tsukagoshi M. Method on the aging evaluation in nuclear power plant concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*. 2014. Vol. 269. P. 286-290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.08.041>.
2. Yi Y., Zhu D., Guo S., Zhang Z., Shi C. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. 103695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>.
3. Liu Q., Huang M., Jin F. Study on durability and service life of concrete structure of coastal tunnel. *Beijing Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Beijing Jiaotong University*. 2018. Vol. 42(6). P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.11860/j.issn.1673-0291.2018.06.001>.
4. Sulikowski J., Kozubal J. The Durability of a Concrete Sewer Pipeline under Deterioration by Sulphate and Chloride Corrosion. *Procedia Engineering*. Vol. 153. P. 698-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.229>.
5. Quraishi M., Nayak D., Kumar R., Kumar V. Corrosion of Reinforced Steel in Concrete and Its Control: An overview. *Journal of Steel Structures & Construction*. 2017. Vol. 03(01). DOI: <https://doi.org/10.4172/2472-0437.1000124>.
6. Xu P., Jiang L., Guo M.Z., Zha J., Chen L., Chen C., Xu N. Influence of sulfate salt type on passive film of steel in simulated concrete pore solution *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223 (2019). P. 352-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.209>.
7. Киричок В. І. Лужні алюмосилікатні зв'язуючі з підвищеною сульфатостійкістю та покриття на їх основі для захисту бетону: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Київ, 2018. 22 с.
8. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair / Oxford, UK: John Wiley & Sons. 2013.
9. Goyal A., Pouya H.S., Ganjian E., Claisse P. A Review of Corrosion and Protection of Steel in Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. Vol. 43. P. 5035-5055. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3303-2>.
10. Ke X., Bernal S.A., Provis J.L. Chloride binding capacity of synthetic C-(A)-S-H type gels in alkali-activated slag simulated pore solutions. *1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future*. 2017. P. 1-7.

11. Baquerizo L.G., Matschei T., Scrivener K.L., Saeidpour M., Wadsö L. Hydration states of AFm cement phases. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 73. P. 143-157. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.011>.
12. Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T., Heviuk I. Performance of multicomponent portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite, and limestone. *Cement, Wapno, Beton*. 2020. Vol. 2020(5). P. 416-427. DOI: <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.5.7>.
13. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fic S., Ivashchyshyn H. Sustainable low-carbon binders and concretes. *E3S Web Conf*. 2020. Vol. 166. 06007. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016606007>.
14. Maes M., Gruyaert E., De Belie N. Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion. *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46. P. 89-103.
15. Khan M.S.H., Kayali O. Chloride binding ability and the onset corrosion threat on alkali-activated GGBFS and binary blend pastes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2018. Vol. 8. P. 1023-1039. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1230522>.
16. Krivenko P. Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2017. Vol. 8. P. 323-334. DOI: <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00042>.
17. Akimkhan A. Structural and Ion-Exchange Properties of Natural Zeolite. *Ion Exchange Technologies*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5772/51682>.
18. Krivenko P., Rudenko I., Konstantynovskyi O. Design of slag cement, activated by Na(K) salts of strong acids, for concrete reinforced with steel fittings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (6 - 108). P. 26-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217002>.
19. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Изд. 2-е. Москва: Технопроект, 1998. 768 с.
20. Нікіфоров О. П. Важкі бетони на шлаковміщуючих в'язучих з комплексними модифікаторами: монографія. Дніпропетровськ: Пороги, 1996. 232 с.
21. Palacios M., Houst Y.F., Bowen P., Puertas F. Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39(8). P. 670-677. DOI: <https://10.1016/j.cemconres.2009.05.005>.
22. Руденко І. І. Наукові основи управління процесами структуроутворення пластифікованих розчинів і бетонів на основі лужних цементів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.05. Київ, 2021. 44 с.
23. Чернявский В. Л. Адаптация абиотических систем: бетон и железобетон. Днепропетровск: ДНУЖТ, 2008. 412 с.
24. Balaguru P., Nazier M., Arafa M. Field implementation of geopolymer coatings. Project report of Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT). Civil and Environmental Engineering Piscataway, NJ: Rutgers State University, 2008.
25. Kryvenko P., Guzii S., Kovalchuk O., Kyrychok V. Sulfate Resistance of Alkali Activated Cements. *Materials Science Forum*. 2016. Vol.865. P. 95-106. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.865.95>.
26. Kryvenko P., Kyrychok V., Guzii S. Influence of the ratio of oxides and temperature on the structure formation of alkaline hydro-aluminosilicates. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5 (83). P. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79605>.
27. Xu R., Pang W., Yu J., Huo Q., Chen J. Chemistry of zeolites and related porous materials: synthesis and structure. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2007. 679 p.

28. ДСТУ Б В.2.6-145:2010 «Захист бетонних та залізобетонних конструкцій від корозії». Київ, 2010. 77 с.

29. ДСТУ-Н Б В.2.6-186:2013 «Настанова щодо захисту будівельних конструкцій будівель та споруд від корозії». Київ, 2013. 29 с.

Кривенко Павло Васильович, докт. техн. наук, професор, директор Науково-дослідного інституту в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0001-7697-2437. Тел.: (044) 245-48-30. E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com.

Руденко Ігор Ігорович, докт. техн. наук, пров. наук. співроб. Науково-дослідного інституту в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0001-5716-8259. Тел.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Константиновський Олександр Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0002-7936-5699. Тел.: (044) 245-48-43. E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Kryvenko Pavlo Vasylovych, DSc (Eng), Prof., Director, Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv national university of construction and architecture. ORCID iD: 0000-0001-7697-2437. Tel.: (044) 245-48-30. E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com.

Rudenko Igor Igorevych, DSc (Eng), leading researcher, Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv national university of construction and architecture. ORCID iD: 0000-0001-5716-8259. Tel.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Konstantynovskiy Oleksandr Petrovych, PhD (Eng), Associate Professor, technology of building constrictions and products (TBCP) department, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-7936-5699. Tel.: (044) 245-48-43. E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Статтю прийнято 09.06.2021 р.

УДК 537.84

ВЕРИФІКАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ТЕЧІЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОЇ РІДИНИ В КРУГЛИХ ТРУБАХ

Доктори техн. наук Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий,
старш. викл. М. В. Мірошникова, магістрант А. Р. Штиков

VERIFICATION OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE FLUID FLOW CALCULATION IN CIRCULAR PIPES

Dr. Sc. (Tech.) N. Chernetskaya-Beletskaya, Dr. Sc. (Tech.) A. Rogovyi,
Sr. lecturer M. Miroshnykova, master A. Shtykov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242076>

Анотація. На основі порівняння результатів чисельного розрахунку з експериментальними даними проведено верифікацію розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах та визначено оптимальну за похибкою розрахунку модель турбулентності й параметрів її використання. Дослідження проводилося на основі порівняння експериментальних досліджень за PIV-методом велосиметрії. Рідина вважалася в'язкою, нестисливою та електропровідною. Керуючі нелінійні рівняння імпульсу розв'язуються чисельно, використовуючи метод контрольних об'ємів. Аналіз суми квадратів

відхилень розрахункових точок від експериментальних показав, що для течії без впливу магнітного поля найкращою є модель турбулентності BSL Reynolds Stress, при наявності магнітного поля – $k-\epsilon$ модель. Кількість елементів сітки практично не впливає на точність розрахунку перепаду тиску.

Ключові слова: електропровідна рідина, верифікація, чисельний розрахунок, математичне моделювання, магнітна гідродинаміка.

Abstract. Magnetohydrodynamics (MHD) treats the phenomena that arise in fluid dynamics from the interaction of an electrically conducting fluid with the electromagnetic field. The development of computational hydrodynamics has significantly improved the accuracy of calculations on mathematical models, but it is still difficult to choose the optimal turbulence models, mesh quality, model parameters to solve a particular problem. The aim of the work is to verify the calculation of the conducting fluid flow in circular pipes and to determine the optimal error of the turbulence model calculation and the parameters of its use. The study was conducted on the basis of a comparison of experimental studies by the PIV-method of velocimetry with the results of numerical calculations. The liquid is considered viscous, incompressible, and electrically conducting. Control nonlinear momentum equations are solved numerically using the method of control volumes. Comparison of velocity profiles showed that almost all models show a fairly good match with the results of the experiment. Analysis of the sum of squares residuals of calculation points from experimental shows that the BSL Reynolds Stress turbulence model is the best for the flow without the influence of the magnetic field, and the $k-\epsilon$ model is the best in the presence of a magnetic field. The SST $k-\omega$ model has quite enough results regardless of the Hartmann number. The number of mesh elements has little effect on the accuracy of the pressure drop calculation. For simple geometries it is enough to use meshes with the number of elements that does not exceed the 500000 elements. According to all criteria, it is rational to choose the $k-\epsilon$ turbulence model for further calculations. This model has some shortcomings in the calculation of wall layers, but allows to obtain high-quality and adequate results for the flow of conducting fluid with a limit on the mesh elements number.

Keywords: electrically conducting fluid, verification, numerical calculation, mathematical modeling, magnetohydrodynamics.

Вступ. Магнітогідродинаміка (МГД) розглядає явища, що виникають під час руху електропровідної рідини внаслідок взаємодії рідини з електромагнітним полем [1, 2]. Вивчення руху електропровідних розплавів металів під поперечно прикладеним магнітним полем стало основою багатьох наукових та інженерних застосувань і пристроїв, а саме МГД-насосів, МГД-генерації електроенергії тощо [3, 4]. З іншого боку, потік пилоподібної електропровідної рідини через трубу в присутності поперечного магнітного поля має такі самі особливості, що й потік рідин у генераторах і плазмових прискорювачах [5].

За останні тридцять років дослідження будь-яких течій рідини щільно пов'язані з

використанням чисельних методів розрахунку [6]. На сьогоднішній день існує досить багато програмних продуктів для CFD-розрахунків. Практично всі вони є валідованими для різних типів течій, але для інженерних розрахунків необхідно проводити верифікацію програмного продукту для розрахунків нових типів задач з метою пошуку оптимальних моделей турбулентності, якості сіткового розбиття та інших параметрів розрахунку [7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Змішані гідродинамічні та електромагнітні проблеми хоча й входять у достатньо нову галузь механіки рідини та газу, але все більше привертають увагу багатьох дослідників. Перша робота щодо

руху електропровідної рідини опублікована Гартманом в 1937 році [8], в ній, на основі аналітичних розрахунків й експериментальним шляхом, досліджувалось поведіння ртуті. Протягом п'ятдесяти років дослідження руху електропровідних рідин проводилося аналітичним шляхом із використанням великої кількості спрощень, що приводило до таких значних похибок у визначенні гідравлічних параметрів, як втрати тиску, швидкість рідини [9]. На відміну від досліджень загальних рідин експериментальні дослідження електропровідних дещо ускладнені внаслідок використання потужних електромагнітів для досліджень і створення однорідних чи неоднорідних магнітних полів [8, 10, 11]. Експериментальні дослідження потребують коштовної сучасної техніки на основі PIV-велосиметрії (оптичний метод візуалізації потоку за зображенням частинок) та значних витрат часу на аналіз результатів внаслідок впливу турбулентності [11].

Розвиток обчислювальної гідродинаміки дозволив значно підвищити точність розрахунків за математичними моделями [11], але все ще залишається складним вибір оптимальних моделей турбулентності, якості сітки, параметрів моделі для вирішення конкретного завдання. Так, в роботі [10] використано метод прямого чисельного моделювання (DNS), що дозволяє дуже точно описати параметри течії, але цей метод практично неможливо використовувати в інженерних розрахунках внаслідок дуже великих витрат часу на розрахунок та аналіз результатів.

В роботі [12] використано декілька таких моделей турбулентності, як k- ϵ , (RNG) k- ϵ , k- ω та SST k- ω , зроблено висновок, що найкраще описує рух рідини (RNG) k- ϵ модель, але, як показує досвід розрахунків течії ньютонівських рідин [13], практично для кожного виду рідин необхідно підбирати свою модель турбулентності [14, 15].

Визначення мети та завдання дослідження. Верифікація розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах та визначення оптимальної за похибкою розрахунку моделі турбулентності й параметрів її використання.

Дослідження проводилося на основі порівняння експериментальних досліджень за PIV-методом велосиметрії, що наведено в роботі [10], з результатами чисельного розрахунку. Рідина вважалася в'язкою, нестисливою та електропровідною. Керуючі нелінійні рівняння імпульсу розв'язувалися чисельно, використовуючи метод контрольних об'ємів у програмному середовищі Ansys CFX. Програмний комплекс використано на умовах студентської ліцензії з обмеженням на кількість елементів, що не перевищує 500000.

Основна частина дослідження. Для проведення верифікації результатів розрахунку необхідно мати надійні експериментальні результати [16], тому вирішено обрати результати велосиметрії електропровідної рідини, що наведені в роботі [10]. Експериментальні дослідження проведені для 30 % водного розчину гідроксиду калію (КОН). Основні фізичні властивості рідини подані в табл. 1.

Таблиця 1

Фізичні властивості 30 % водного розчину гідроксиду калію

		КОН
ρ	Густина, кг/м ³	1280
μ	Динамічна в'язкість, Па с	0,00143
ν	Кінематична в'язкість, м ² /с	$1,18 \times 10^{-6}$
σ	Електропровідність, См/м	73,67
λ	Теплопровідність, Вт/(м К)	0,727
C_p	Теплоємність, Дж/(кг К)	3000

Верифікацію проведено на основі порівняння профілів швидкості рідини під впливом поперечного магнітного поля та без нього.

Під час математичного моделювання розглянуто випадок стаціонарного руху нестисливої рідини, що має постійну

електропровідність і знаходиться під дією зовнішнього стаціонарного однорідного магнітного поля.

Математична модель складається з рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини (1) та рівняння нерозривності (2) [17]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

де p – гідродинамічний тиск;

ρ – густина;

x_j – декартові координати;

u_j – проекції швидкості в декартовій системі координат;

t – час;

f_i – проекції вектора масових сил на осі координат;

μ – динамічна (молекулярна) в'язкість.

У розглянутій задачі течії електропровідної рідини як масову силу f_i необхідно врахувати силу Лоренца [18].

Рідина піддається впливу зовнішнього магнітного поля з вектором магнітної індукції \vec{B} . Потік рідини буде індукувати електричні струми в рідині, а вони в свою чергу породжують індуковане магнітне поле, яке можна розглядати як збурення зовнішнього поля. Відносний розмір цього збурення регулюється безрозмірним магнітним числом Рейнольдса

$$Rm_L = \eta \sigma u L, \quad (3)$$

де η – магнітна проникність;

L – характерний розмір.

У більшості промислових та лабораторних течій магнітне число Рейнольдса дуже низьке, $Rm_L \ll 1$. Збурення магнітного поля, спричинені течією рідини, незначні у порівнянні з зовнішнім полем. Використовуючи це «квазістатичне наближення», нерелятивістські рівняння Максвелла дають визначення сили Лоренца

$$\vec{f} = [\vec{j} \times \vec{B}], \quad (4)$$

де \vec{j} – густина електричного струму, що виникає в електропровідній рідині, яка рухається зі швидкістю \vec{u} за рахунок місцевого електричного поля з напругою \vec{E} і магнітного поля, що визначається узагальненим законом Ома [19]:

$$\vec{j} = \sigma [\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}]. \quad (5)$$

Скалярний електростатичний потенціал φ визначається за формулою

$$\vec{E} = -\nabla \varphi. \quad (6)$$

За відсутності вільних зарядів

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot [\vec{u} \times \vec{B}]. \quad (7)$$

Розв'язання отриманої системи диференціальних рівнянь в часткових похідних (1)–(7) можливе чисельними методами, але внаслідок того, що для їх розв'язання необхідно використати надзвичайно великі комп'ютерні потужності з великими витратами часу на обробку результатів, оптимальним є осереднення рівнянь Нав'є-Стокса за Рейнольдсом [20]. Цей підхід заснований на осередненні рівнянь, а потім на їх інтегруванні. При цьому з'являється додатковий тензор напруг, але, у випадку стаціонарної осередненої турбулентної течії обертаються в нуль локальні прискорення. Розрахунок таких рівнянь значно спрощується порівняно з рівняннями Нав'є-Стокса.

Осереднення Рейнольдса застосовується шляхом розділення миттєвих змінних на середню та пульсаційну частини. Середнє значення величини v визначається як середнє значення ансамблю за нескінченною кількістю реалізацій v_n [18]

$$\langle v \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n. \quad (8)$$

Будемо використовувати великі літери для середніх значень, а малі – для

$$\rho \frac{\partial Q}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial Q}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_Q \frac{\partial Q}{\partial x_j} + \rho \langle u'_j q' \rangle \right) + S_Q, \quad (11)$$

де S_Q – джерело;

Γ_Q – дифузійна складова потоку величини Q .

У рівняннях руху члени виду $\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ є напругами Рейнольдса. Для визначення зв'язку між напругами Рейнольдсу та іншими параметрами потоку необхідно використовувати додаткові залежності – модель турбулентності [19, 21].

позначення пульсаційних. Швидкість, наприклад, виражається як сума $U_i + u'_i$, де U_i – середня швидкість, а u'_i – пульсаційна складова швидкості. За визначенням, середнє значення пульсаційних складових дорівнює нулю.

Осереднення описаним способом рівнянь (1) і (2) дає осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса (RANS) та рівняння нерозривності:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \rho \langle u'_i u'_j \rangle \right) + F_i, \quad (9)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (10)$$

де F_i – сила Лоренца.

Після осереднення Рейнольдса рівняння транспорту величини Q через поверхню, яка обмежує контрольний об'єм, враховуючи, що $q = Q + q'$,

В даний час розроблені сотні моделей турбулентності, але жодна з них не є універсальною, тобто підходящою для будь-яких течій [22].

Осереднення Рейнольдса необхідно здійснити також для рівнянь Максвелла (4)–(7). Таким чином, середня сила Лоренца

F_i у рівнянні (9) визначається таким чином:

$$\bar{F} = [\bar{J} \times \bar{B}]. \quad (12)$$

Середня густина електричного струму

$$\bar{J} = \sigma [-\nabla\Phi + \bar{U} \times \bar{B}]. \quad (13)$$

Використовуючи рівняння $\nabla \cdot \bar{J} = 0$, отримуємо

$$\nabla(\sigma \nabla\Phi) = \nabla \cdot [\sigma \bar{U} \times \bar{B}]. \quad (14)$$

Для постійної електропровідності σ

$$\nabla^2\Phi = \nabla \cdot [\bar{U} \times \bar{B}]. \quad (15)$$

Силу Лоренца можна обчислити, якщо спочатку розв'язати рівняння (14) з відповідними граничними умовами. Якщо \bar{n} – орт внутрішньої нормалі, то рівняння (13) розв'язують з граничною умовою Неймана:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = -\frac{J_n}{\sigma} + \bar{n} \cdot [\bar{U} \times \bar{B}], \quad (16)$$

де $J_n = \bar{J} \cdot \bar{n}$ – струм на вході в домен. Непровідна стінка має нульовий струм за нормаллю $J_n = 0$. Для нерухомої стінки з граничною умовою відсутності ковзання гранична умова для Φ тоді просто

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0. \quad (17)$$

Формальне розв'язання рівняння (14) лише з граничними умовами Неймана містить невизначений постійний член. Для завдання граничних умов електричний потенціал повинен бути чітко вказаний

принаймні в одній точці області. Як альтернатива, фіксований електричний потенціал може бути заданий на одній або декількох стінках.

У моделях турбулентної в'язкості напруги Рейнольдса моделюються з використанням гіпотези Бусінеска [19, 23], яка зв'язує анізотропію напруг Рейнольдса з турбулентною в'язкістю,

$$\rho \langle u'_i u'_j \rangle = -\frac{2}{3} \rho K \delta_{ij} + \mu_T S_{ij}, \quad (18)$$

де μ_T – турбулентна в'язкість;

K – кінетична енергія турбулентності та осереднений тензор відносних швидкостей деформацій S :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (19)$$

Під час даного дослідження виявлено, що раціональні результати за часом розрахунку та якістю співпадіння результатів розрахунку та експерименту показала модель турбулентності k-ε. Тому математична модель, яка для цієї моделі складається з двох рівнянь перенесення характеристик турбулентності наведена саме для цієї моделі турбулентності. Математичне формулювання інших використаних моделей турбулентності можна знайти в джерелах [17, 22, 24].

Модель турбулентності k-ε містить два диференціальних рівняння для перенесення характеристик турбулентності: кінетичної енергії турбулентності K й швидкості її дисипації \mathcal{E} .

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{K^2}{\mathcal{E}}, \quad (20)$$

де C_μ – емпіричний коефіцієнт моделі.

Якщо напруги Рейнольдса в рівнянні (9) замінити записом (18), отримаємо

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left([\mu + \mu_T] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + F_i, \end{aligned} \quad (21)$$

За аналогією з рівнянням (18) маємо гіпотезу, що

$$\rho \langle u'_i q' \rangle = \frac{\mu_T}{\sigma_Q} \frac{\partial Q}{\partial x_i}, \quad (22)$$

де σ_Q – турбулентне число Прандтля. Тоді осереднене рівняння перенесення величини Q набуває вигляду

$$\rho \frac{\partial Q}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial Q}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left[\Gamma_Q + \frac{\mu_T}{\sigma_Q} \right] \frac{\partial Q}{\partial x_j} \right) = S_Q. \quad (23)$$

Нехтуючи молекулярною дифузією [25],

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial K}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) = \rho (P_K - \varepsilon) + S_K, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \\ = \rho \left(C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} P_K - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \right) + S_\varepsilon. \end{aligned} \quad (25)$$

Тут P_K – генераційний член, який моделюється з використанням гіпотези турбулентної в'язкості (18),

$$P_K = \frac{P_{ii}}{2} = \frac{\mu_T}{\rho} S_{ij} S_{ji}. \quad (26)$$

S_K, S_ε – джерельні члени, зумовлені масовими силами в рівняннях Нав'є-Стокса (1). $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_K, \sigma_\varepsilon$ – емпіричні константи моделі [22, 24].

Таким чином, математична модель, що розв'язується програмним комплексом чисельним способом за допомогою методу контрольних об'ємів, складається з рівнянь (12)–(26).

Для розрахунку використано програмний продукт Ansys CFX на умовах академічної студентської ліцензії. Число елементів сіткового розбиття не перевищувало 500000. Цей програмний комплекс є валідованим для усіх класів течій, у тому числі для розрахунків магнітної гідродинаміки [18, 24, 26].

Сітки побудовані на основі призматичних і тетрагональних елементів [27]. Розрахунки завершувалися при виконанні двох умов: зменшення нев'язань розв'язання всіх рівнянь до значень 10^{-5} і забезпечення постійного за ітераціями перепаду тиску в трубопроводі. Тобто перепад тиску повинен змінюватися не більше ніж на 0,1% за 10 ітерацій, коли визначено, що зміна перепаду має коливальний характер.

Використовувалися чисельні схеми другого порядку.

У вхідному перетині каналу трубопроводу задавалася максимальна швидкість величиною $V_{\max} = 0,14$ м/с. Для моделювання повністю розвинутого прилежого шару біля твердих стінок профіль швидкості на вході задавався за залежністю

$$V = V_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}, \quad (27)$$

де r – поточний радіус точки в перетині труби;

$R = 0,0445$ м – радіус труби.

У вихідному перетині труби задавалася відкрита межа з нульовим статичним тиском. Інтенсивність турбулентності задана величиною 5 % згідно з роботою [28]. Моделювалися турбулентні режими течії з числами Рейнольдса $Re = 11300$, тобто геометричні параметри та числа Рейнольдса були такі, як і в експерименті [10].

Вибір найкращої моделі турбулентності здійснено на основі порівняння профілів швидкості в трубі. Загалом порівнювалися чотири моделі турбулентності. Графіки розподілу швидкості наведено на рис. 1.

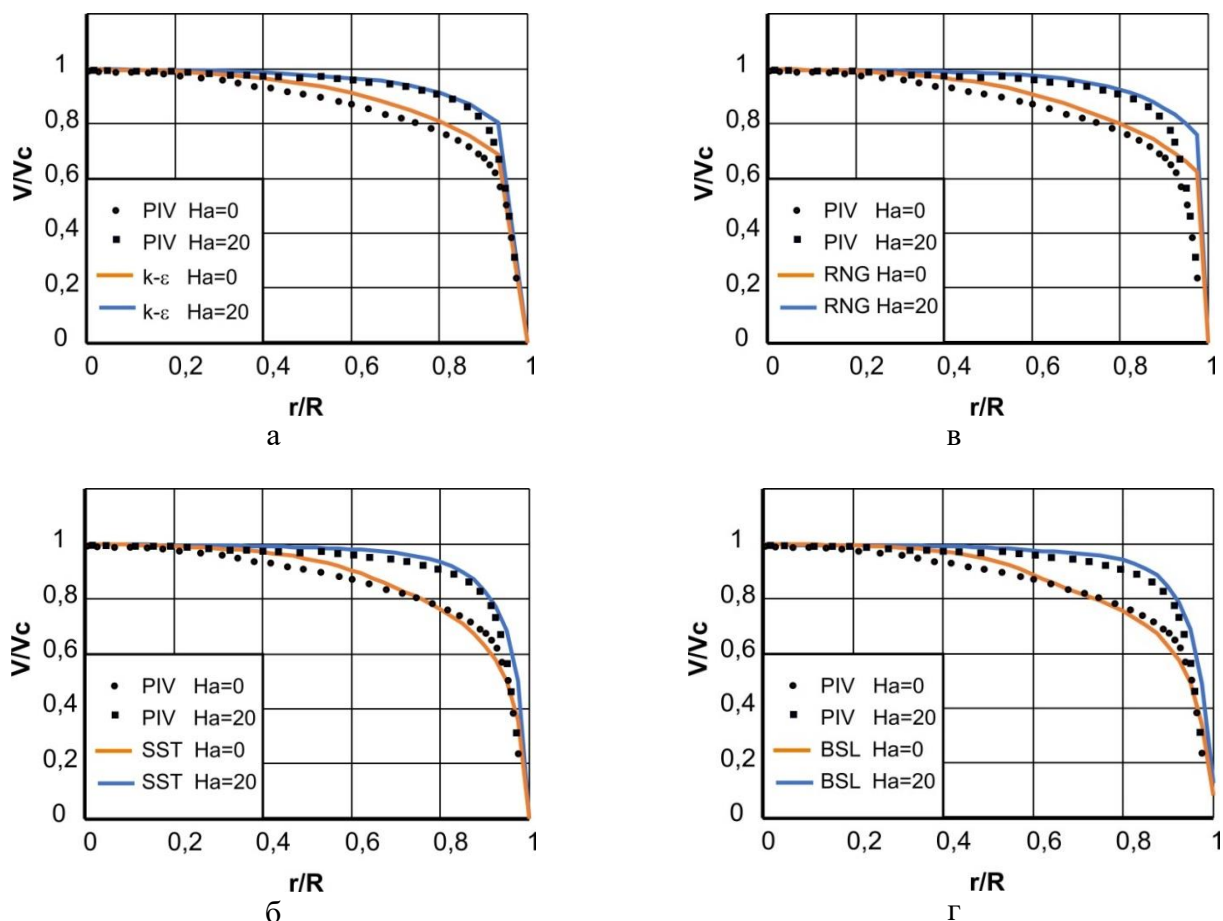


Рис. 1. Порівняння розподілу швидкості в трубі з використанням різних моделей турбулентності: а – k- ϵ ; б – SST k- ω ; в – (RNG) k- ϵ ; г – BSL Reynolds Stress

Для порівняння результатів МГД розрахунків використовують критеріальне число Гартмана

$$Ha = BR\sqrt{\sigma / \rho\nu} . \quad (28)$$

Практично всі моделі демонструють досить гарний збіг з результатами експерименту. Для обґрунтування вибору моделі визначено суму квадратів відхилень розрахункових точок від експериментальних. Результати щодо суми квадратів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Сума квадратів відхилень розрахункових точок від експериментальних для різних моделей турбулентності

Модель турбулентності	Число Гартмана, Ha	Сума квадратів відхилень
k-ε	0	0,0469
	20	0,0208
SST k-ω	0	0,0377
	20	0,0471
(RNG) k-ε	0	0,0836
	20	0,246
BSL Reynolds Stress	0	0,0228
	20	0,0537

Аналіз даних табл. 2 показує, що для течії без впливу магнітного поля найкращою є модель турбулентності BSL Reynolds Stress, при наявності магнітного поля – k-ε модель. SST k-ω модель має досить гарні показники без залежності від числа Гартмана. SST k-ω модель турбулентності демонструє досить посередні показники внаслідок малої кількості використаних елементів у сітковому розбитті. Збільшення елементів у прилеглому шарі та відповідне зменшення показника u^+ має покращити якість розрахунку за цією моделлю [31], але це збільшить час розрахунку, що є небажаним під час пошуку оптимальних параметрів розрахунку електропровідної рідини для інженерної мети створення установки для очищення конденсаторних труб.

Порівняння контурів розподілу швидкості течії електропровідної рідини з числом Гартмана ($Ha=20$) для різних моделей турбулентності наведено на рис. 2.

Тут можна бачити, що за кольором розподілу швидкості практично не можна розрізнити моделі турбулентності, тому за усіма критеріями раціонально для подальших розрахунків обрати k-ε модель турбулентності. Ця модель має деякі недоліки щодо розрахунку пристінних шарів, але дозволяє отримати якісні та адекватні результати для течії електропровідної рідини з обмеженням на кількість елементів розрахункової сітки.

На рис. 3 наведено аналіз вибору сіткового розбиття. Аналіз проведено для двох моделей турбулентності k-ε та SST.

Отримано, що кількість елементів сітки практично не впливає на точність розрахунку перепаду тиску. Перепад тиску віднесено до перепаду тиску, який одержано для сіток з кількістю елементів 500000. Це означає, що незалежно від моделі турбулентності для простих геометрій достатньо використовувати сіткові розбиття з кількістю елементів, що не перевищує параметри академічної ліцензії Ansys CFX.

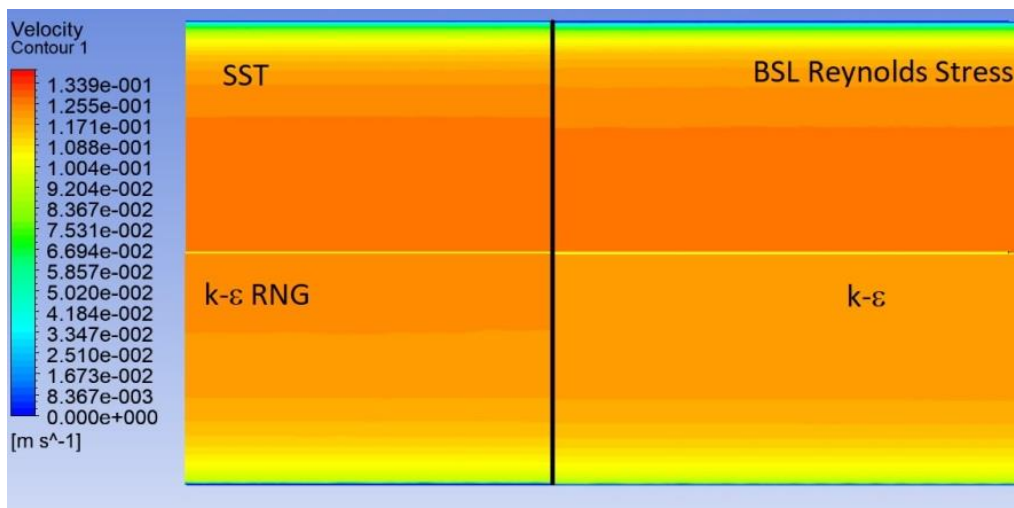


Рис. 2. Порівняння контурів швидкості течії рідини з числом Гартмана ($Ha=20$)

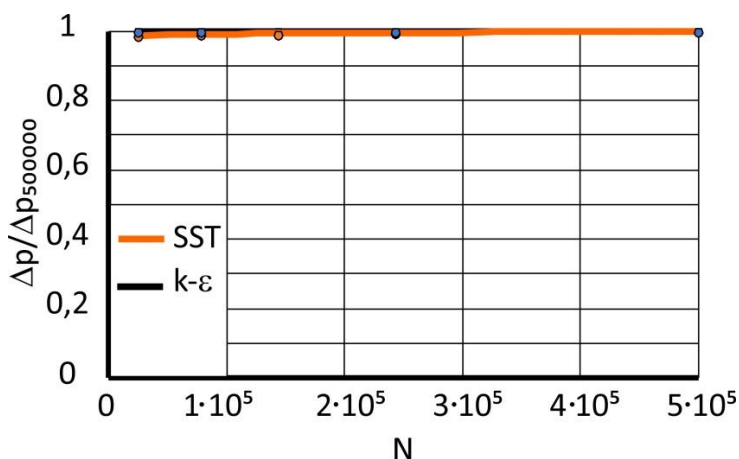


Рис. 3. Залежність результатів розрахунку перепаду тиску в трубопроводі від кількості елементів сітки

Висновки. На основі порівняння результатів чисельного розрахунку з експериментальними даними проведено верифікацію розрахунку течії електропровідної рідини в круглих трубах та визначено оптимальну за похибкою розрахунку модель турбулентності й параметрів її використання.

1. Порівняння профілів швидкості показало, що практично всі моделі демонструють досить гарний збіг з результатами експерименту.

2. Аналіз суми квадратів відхилень розрахункових точок від експериментальних показує, що для течії без впливу магнітного поля найкращою є модель турбулентності BSL Reynolds Stress, при наявності магнітного поля – k-ε модель.

3. Кількість елементів сітки практично не впливає на точність розрахунку перепаду тиску. Для простих геометрій достатньо використовувати сіткові розбиття з кількістю елементів, що не перевищує $5 \cdot 10^5$ елементів.

Список використаних джерел

1. Frank M. Visual analysis of two-dimensional magnetohydrodynamics. *Phys. Fluids*. 2001. Vol. 13. 2287-2295.
2. Gedik E., Kurt H., Recebli Z. CFD simulation of magnetohydrodynamic flow of a liquid-metal galinstan fluid in circular pipes. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2013. 9(1). P. 23-33.
3. Sabu A. S., Mathew A., Neethu T. S., George K. A. Statistical analysis of MHD convective ferro-nanofluid flow through an inclined channel with hall current, heat source and solet effect. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. 22. 100816.
4. Nijhawan P., Singla M. K., Gupta J. A Proposed Hybrid Model for Electric Power Generation: A Case Study of Rajasthan, India. *IETE Journal of Research*. 2021. P. 1-11.
5. Attia H. A., Ahmed M. E. Circular pipe MHD flow of a dusty Bingham fluid. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2005. 8(4). P. 257-265.
6. Сємин Д. А., Роговой А. С. Влияние типа и размера расчетных сеток на точность расчета течений в вихрекамерных нагнетателях. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Сер. Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2016. № 41 (1213). С. 70-77.
7. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах / Д. А. Сємин, А. С. Роговой, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Сер. Машинобудування. 2016. № 2 (77). С. 71-78.
8. Hartmann J., Lazarus F. Hg-dynamics II. Theory of laminar flow of electrically conductive Liquids in a Homogeneous Magnetic Field. 1937. 15(7). 47 p.
9. Davidson P. A. Magnetohydrodynamics in materials processing. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1999. 31(1). P. 273-300.
10. Takeuchi J., Satake S.I., Morley N.B., Kunugi T., Yokomine T., Abdou M.A. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe. *Fusion Engineering and Design*. 2008. 83 (7-9). P. 1082-1086.
11. Zhang X., Pan C., Xu Z. Experimental investigations on liquid metal MHD turbulent flows through a circular pipe with a conductive wall. *Fusion Engineering and Design*. 2017. 125. P. 647-652.
12. Rogovyi A. S. Verification of fluid flow calculation in vortex chamber superchargers. *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр.* Харьков, 2016. Вып. 39. С. 39-46.
13. Tavangar S., Hashemabadi S. H., Saberimoghadam A. CFD simulation for secondary breakup of coalewater slurry drops using OpenFOAM. *Fuel Process Technol.* 2015. 132. P. 153-163.
14. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. *In MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. 01009.
15. Rogovyi A., Korohodskiy V., Medvediev Ye. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*. 2021. Vol. 218. 119432.
16. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. American Institute of aeronautics and astronautics; 1998. 15 p.
17. Сьомін Д. О., Роговий А. С. Вихорокамерні нагнітачі: монографія. Харків. ФОП Мезіна В. В. 2017. 204 с.
18. Widlund O. Implementation of MHD model equations in CFX 4.3. 2000. P. 133–179.
19. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. Изд. 7-е, испр. Москва: Дрофа, 2003. 840 с.
20. Роговий А. С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів: дис... д-ра техн. наук : спец. 05.05.17 / Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. Харків, 2017. 364 с.

21. Математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива / Н. Б. Чернецька-Білецька, А. С. Роговий, І. О. Баранов, М. В. Мірошникова. *Вісник СНУ ім. В. Даля*. Сєверодонецьк: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. 2018. № 1 (242). С. 159-164.
22. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособ. Санкт-Петербург: Изд-во Политех-го ун-та, 2012. 88 с.
23. Вихрові виконавчі пристрої: у 2-х ч.: монографія / Д. О. Сьомін, В. О. Павлюченко, Я. І. Мальцев, С. В. Войцеховський, А. С. Роговий, Л. В. Дмитрієнко, М. О. Мальцева. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. Ч. 1. Однорідні робочі середовища. 256 с.
24. Ansys C. F. X. Solver Theory Guide. Release 2019 R3. Canonsburg: ANSYS. 2019. 814 p.
25. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Appl. Mech. and Eng.* 1974. 3. P. 269–289.
26. Zhang H., Li J., Wang Z., Xu Y., Lai Y. The numerical modeling of melt flow and mhd instabilities in an aluminum reduction cell. *JOM*, 2010. 62(11). P. 26-31.
27. Matyushenko A. A., Stabnikov A. S., Garbaruk A. V. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar-turbulent transition. *In Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400, No. 7. 077047.
28. Han X., Sagaut P., Lucor D. On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions. *Comput. Fluids*. 2012. Vol. 61. P. 2–5.
-

Чернецька-Білецька Наталія Борисівна, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

ORCID iD: 0000-0002-7782-4003. Тел.: +38(050)745-36-30. E-mail: logistyka.snu.edu.ua@gmail.com.

Роговий Андрій Сергійович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри гідравлічних машин НТУ «ХПІ».

ORCID iD: 0000-0002-6057-4845. E-mail: asrogovoy@ukr.net.

Мірошникова Марія Володимирівна, старший викладач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

ORCID iD: 0000-0002-8370-6724. E-mail: citroen4ik@gmail.com.

Штиков Антон Романович, магістрант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Chernetskaya-Beletskaya Nataliia, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of logistics and traffic safety, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. ORCID iD: 0000-0002-7782-4003. Tel.: +38(050)745-36-30.

E-mail: logistyka.snu.edu.ua@gmail.com.

Rogovyi Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of the department of Hydraulic machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-6057-4845. E-mail: asrogovoy@ukr.net.

Miroshnykova Mariia, Senior Lecturer, department of logistics and traffic safety, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. ORCID iD: 0000-0002-8370-6724. E-mail: citroen4ik@gmail.com.

Shtykov Anton, master, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.

Статтю прийнято 16.06.2021 р.

УДК 624.15:624.012

РОЗРАХУНОК ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦІЙ

Кандидати техн. наук С. В. Єсакова, Д. О. Чепурний, асп. А. Ю.Купрейчик

CALCULATION OF FUNDAMENTAL STRUCTURES BY THE METHOD OF DEFORMATIONS

PhD (Tech.) S. Yesakova, PhD (Tech.) D. Chepurnui, postgraduate student A. Kupreichyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242165>

Анотація. Метод деформації дозволяє описати напружено-деформований стан конструкції фундаменту через залежність, що пов'язує осідання фундаменту з параметрами жорсткості системи «фундамент-грунт» за різних коефіцієнтів жорсткості по довжині конструкції або глибині фундаменту. Запропонований спосіб може покращити розрахунок напружено-деформованого стану симетрично та асиметрично завантажених фундаментів, що значно підвищить експлуатаційні характеристики будівель і споруд. Деформація фундаментної конструкції описується наближеною кореляцією, включаючи осідання фундаменту і параметр жорсткості системи «фундамент-основа». Розрахунок охоплює різні (лінійні та нелінійні) режими розподілу жорсткості конструкції по довжині конструкції та характеристики розподілу ґрунтової основи.

Ключові слова: фундамент, розподілене навантаження, основа Вінклера, пружний напівпростір, коефіцієнт жорсткості основи.

Abstract. The unceasing process of urbanization all over the world and the constantly growing cost of land plots allotted for development makes investors, scientists and engineers look for and find ways to reduce the unit cost of construction of useful areas of buildings and structures for various purposes.

The most effective way to reduce the unit cost of construction of useful areas of buildings and structures is to increase their number of storeys and depths of underground parts. But with an increase in the height of buildings, the loads on their foundations also increase, stimulating scientists and engineers to search for more advanced methods and methods for solving problems related to determining the rational parameters of the foundations of buildings and structures, improving the quality and reliability of the calculation methods used.

The results obtained using modern methods of calculating foundations in some cases lead to an overestimation of the costs of building materials, in some – to a decrease in comparison with the real strength and deformation indicators of the foundations of construction objects.

This book describes a deformation method that allows you to improve the calculations of the stress-strain state of pile and some other types of foundations by expressing the deformations of foundation structures by the dependence of the foundation settlement on the rigidity of the «foundation-foundation» system and the coefficient of foundation rigidity, which varies along the length or depth of the foundations, which will significantly improve the performance of buildings and structures.

Based on the hypothesis of direct proportionality (Winkler), we use the ability of such a model of the basis to take any variable stiffness along the length of the structure that transmits the load to the ground. Representing a system of unconnected springs of different stiffness, such a base is able to mimic the resolution of the currently used different models within the base of the foundations.

However, outside the sole, Winkler cannot consider the resolution of the real soil in terms of interaction with adjacent foundations. Thus, we are going to take into account only the «internal» resolution of different models of the basis. It is not difficult to obtain this information using analytical and numerical methods for determining the stress-strain state of the soil base.

Keywords: foundation, distributed load, Winkler base, elastic half-space, base stiffness coefficient.

Вступ. У зв'язку з розширенням обсягів будівництва та реконструкції [1] будівель і споруд в умовах обмеженого простору міст, а також складних інженерно-геологічних умовах [2] відбувається істотна потреба в використанні несучої здатності ґрунтової основи та розширенні понять про її жорсткість. За останні роки накопичилися нові експериментально-теоретичні дослідження [3], [4], [5], [6], [7], які дозволяють істотно скоригувати положення чинних норм, а крім того, в ряді випадків отримувати економічніші або надійніші споруди. Деформаційний спосіб дозволяє вдосконалити розрахунки напружено-деформованого стану фундаментів шляхом вираження деформацій фундаментних конструкцій залежністю осідань фундаменту від жорсткості системи «основа – фундамент» і коефіцієнта жорсткості основи, яка змінюється по довжині або глибині фундаментів, що дозволить підвищити якості розрахунків різних варіантів фундаментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У своїх дослідженнях до «деформаційного» методу близько підійшов В. А. Флорін [8] при розв'язанні контактних задач розрахунку фундаментів на основі з лінійним розподілом коефіцієнта постелі. Ним розглядалися тільки абсолютно жорсткі конструкції. Однак В. А. Флорін показав, як, задавшись законами зміни коефіцієнта постелі і деформацій фундаменту, можна отримати рівняння рівноваги, з яких знаходяться вертикальні переміщення і кут повороту конструкції, а потім і опір основи.

Взявши за основу гіпотезу прямої пропорційності (Вінклера), ми використовуємо здатність такої моделі основи приймати будь-яку змінну

жорсткість по довжині конструкції, що передає навантаження на ґрунт. Являючи собою систему незв'язаних між собою пружин різної жорсткості, така основа здатна в межах подошви фундаментів імітувати розподільну здатність використовуваних нині різних моделей [9]: напівплощина, напівпростір, кінцевий шар [10], [11], шар кінцевої ширини [12] та ін. Однак за межами подошви «Вінклер» не може врахувати розподільну здатність реального ґрунту з точки зору взаємовпливу з розташованими поряд фундаментами [13].

Також суть висновків щодо впливу жорсткості надземних конструкцій на зусилля міститься в роботі [15], де наводяться результати випробувань балок різної жорсткості на ґрунтовій основі і порівняння отриманих дослідних даних з результатами чисельного моделювання.

Для отримання більш достовірного прогнозу НДС системи будівля – фундамент на пружній основі автори [16] вважають доцільним проводити розрахунки з використанням контактної моделі у вигляді двохшарової балки на пружній основі вінклерівського типу зі змінним коефіцієнтом постелі, яка дозволяє врахувати такі фактори, як зміна жорсткості основи й облік жорсткості надфундаментної конструкції.

Таким чином, ми збираємося врахувати тільки «внутрішню» розподільну здатність різних моделей основи. Отримати цю інформацію не складно, користуючись аналітичними та чисельними методами визначення напружено-деформованого стану ґрунтової основи.

Визначення мети та завдання дослідження. Виявити спосіб розрахунку навантаженого фундаменту, що більш

вірогідно описує його взаємодію з основою Вінклера, і розробити методику розрахунку системи «фундамент-грунт».

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз існуючих розрахункових моделей та експериментальних лабораторних і натурних досліджень;

- розроблення аналітичного і чисельного методів розрахунку;

- порівняння одержуваних теоретичних результатів з існуючими рішеннями і результатами, отриманими в програмному комплексі.

Основна частина дослідження.

Схожі аналітичні розрахунки робив Б. Н. Жемочкін [14], визначаючи епюру реакцій під жорсткими штампами, які спиралися б на напівпростір і напівплощину. Звичайно, що при симетричному завантаженні штампів виходячи з закономірності розподілу опорів будуть подібні закону зміни коефіцієнта постелі, а рішення по обох моделях дадуть однакові прогини і реакцію основи.

1. Розрахунок балок на симетричне навантаження з можливістю регулювання жорсткості

1.1. Максимальний прогин в центрі балки

Розглядаючи фундамент з довільним навантаженням (рис. 1), прийемо, закон зміни коефіцієнта постелі у вигляді

$$C_z = C_0 \cdot [1 - 4 \cdot \alpha \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z})] \quad (1-a)$$

або

$$C_z = C_0 \cdot [1 - \alpha \cdot \sqrt[n]{\sin(\pi \cdot \bar{z})}] \quad (1-b)$$

де C_0 — крайові значення коефіцієнта постелі;

α — коефіцієнт розподільної здатності основи.

Ввівши коефіцієнт жорсткості конструкції ξ , запишемо прогини гнучкої балки у вигляді рис. 1.

Розрахункову схему симетрично навантаженої балки (смуги) наведено на рис. 1.

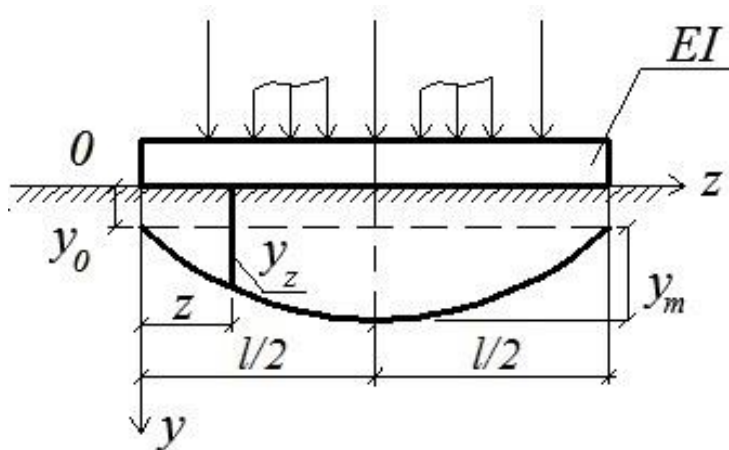


Рис. 1. Розрахункова схема балки з максимальним прогином в центрі

Прогин балки подамо у вигляді

$$y_z = y_0 \cdot [1 + \xi \cdot \sin(\pi \cdot \bar{z})], \quad (2-b)$$

$$y_z = y_0 \cdot [1 + 4 \cdot \xi \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z})], \quad (2-a)$$

де ξ — коефіцієнт жорсткості, що дорівнює

або

$$\xi = \frac{y_m}{y_0}. \quad (3)$$

Коефіцієнт постелі описується формулою (1), а контактні напруги σ_z описуються залежністю

$$\sigma_z = C_0 \cdot y_0 \cdot [1 - 4 \cdot \alpha \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z})] \cdot [1 + 4 \cdot \xi \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z})], \quad (4)$$

що приводиться до виразу

$$\sigma_z = C_0 \cdot y_0 \cdot [1 - 4 \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z}) \cdot (\alpha - \xi) - 16 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot \bar{z}^2 \cdot (1 - \bar{z})^2].$$

Знайдемо сумарний відпір основи

$$\begin{aligned} \int_0^l \sigma_z dz &= C_0 \cdot y_0 \cdot l \cdot \left[1 - 4 \cdot \frac{1}{6} \cdot (\alpha - \xi) - \frac{16}{30} \cdot \alpha \cdot \xi \right] = \\ &= \frac{y_0 \cdot C_0 \cdot l}{3} [3 - 2 \cdot (\alpha - \xi) - 1.6 \cdot \alpha \cdot \xi]. \end{aligned} \quad (5)$$

З умови $\sum N_0 = 0$ отримаємо невідоме переміщення

$$y_0 = \frac{1.5}{[(1.5 - \alpha) + \xi \cdot (1 - 0.8 \cdot \alpha)]} \cdot \frac{\sum N_0}{C_0 \cdot l}. \quad (6-a)$$

Відзначимо, що при використанні для прогинів балки формули (2-б) одержимо

$$\begin{aligned} \sigma_z &= C_0 \cdot y_0 \cdot [1 + \xi \cdot \sin(\pi \cdot \bar{z}) - 4 \cdot \alpha \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z}) \cdot (1 + \xi \cdot \sin(\pi \cdot \bar{z}))], \\ \int_0^1 \sigma_z \cdot dz &= C_0 \cdot y_0 \cdot l \cdot \left[1 + \frac{2}{\pi} \cdot \xi - \frac{2}{3} \cdot \alpha + 4 \cdot \alpha \cdot \xi \cdot \left(0.1893 - \frac{1}{\pi} \right) \right], \end{aligned}$$

а з умови рівноваги

$$y_0 = \frac{1.5}{[(1.5 - \alpha) + \xi \cdot (0.955 - 0.774 \cdot \alpha)]} \cdot \frac{\sum N_0}{C_0 \cdot l}, \quad (6-б)$$

тобто отримано практично той самий результат, що і за формулою (6-а).

Далі контактні напруги подамо у вигляді

$$\frac{\sigma_z}{y_0} = F_1 - 4 \cdot \alpha \cdot F_2 + 4 \cdot \xi \cdot F_2 - 16 \cdot \alpha \cdot \xi \cdot F_3, \quad (7)$$

де F_i – функції, що дорівнюють

$$F_1 = 1; \quad F_2 = \bar{z} \cdot (1 - \bar{z}); \quad F_3 = \bar{z}^2 \cdot (1 - \bar{z})^2.$$

Неважко встановити їх площі f_i і відстані \bar{z}_i^0 від центра ваги до осі у:

$$f_1 = 1; \quad f_2 = \frac{1}{6}; \quad f_3 = \frac{1}{30};$$

$$\bar{z}_1^0 = 0.5; \quad \bar{z}_2^0 = 0.5; \quad \bar{z}_3^0 = 0.5.$$

Друга умова рівноваги $\sum M_0 = 0$ дає

$$\sum M_0 = C_0 \cdot y_0 \cdot l^2 \cdot \left[\left(1 \cdot 0.5 - 4 \cdot \alpha \cdot \frac{1}{12} \right) + 4 \cdot \xi \cdot \left(\frac{1}{12} - 4 \cdot \alpha \cdot \frac{1}{60} \right) \right] =$$

$$= \frac{C_0 \cdot y_0 \cdot l^2}{6} \cdot [(3 - 2 \cdot \alpha) + 2 \cdot \xi \cdot (1 - 0.8 \cdot \alpha)],$$

звідки отримуємо

$$y_0 = \frac{3}{[(1.5 - \alpha) + \varepsilon \cdot (1 - 0.8 \cdot \alpha)]} \cdot \frac{\sum M_0}{C_0 \cdot l}. \quad (8)$$

Однак через симетрію навантаження

$$\sum M_0 = \frac{l}{2} \cdot \sum N_0,$$

тому рівняння (6) і (8) збігаються.

При абсолютно жорсткій балці ($\xi = 0$) загальне переміщення фундаменту дорівнює

$$y_0 = \frac{1.5 \cdot \sum N_0}{(1.5 - \alpha) \cdot C_0 \cdot l}. \quad (9)$$

Приклад розрахунку 1. Як приклад розглянемо плоску задачу завантаження смуги центральною зосередженою силою P (рис. 2). При цьому приймаємо $\alpha = 0.7$ і

розглядаємо розподіл відносних прогинів \bar{y}_z і відпір $\bar{\sigma}_z$ при різних значеннях коефіцієнта жорсткості ξ .

Прогини обчислюємо за формулами (2-а) і (6-а) при $\sum N_0 = P$; а напруги – за формулою (4).

Результати обчислень подані на рис. 2. Там же відмічені значення \bar{y}_0 та \bar{y}_m , пов'язані між собою залежністю (2).

Як видно з наведених на рис. 2 епюр $\bar{\sigma}_z$ та \bar{y}_z , їх розподіл істотно залежить від коефіцієнта ξ , що вплине на розподіл зусиль в конструкції фундаменту. Відзначимо також існування фокусних точок O_σ та O_y на відстані $\sim 0.17 \cdot l$ від краю фундаменту.

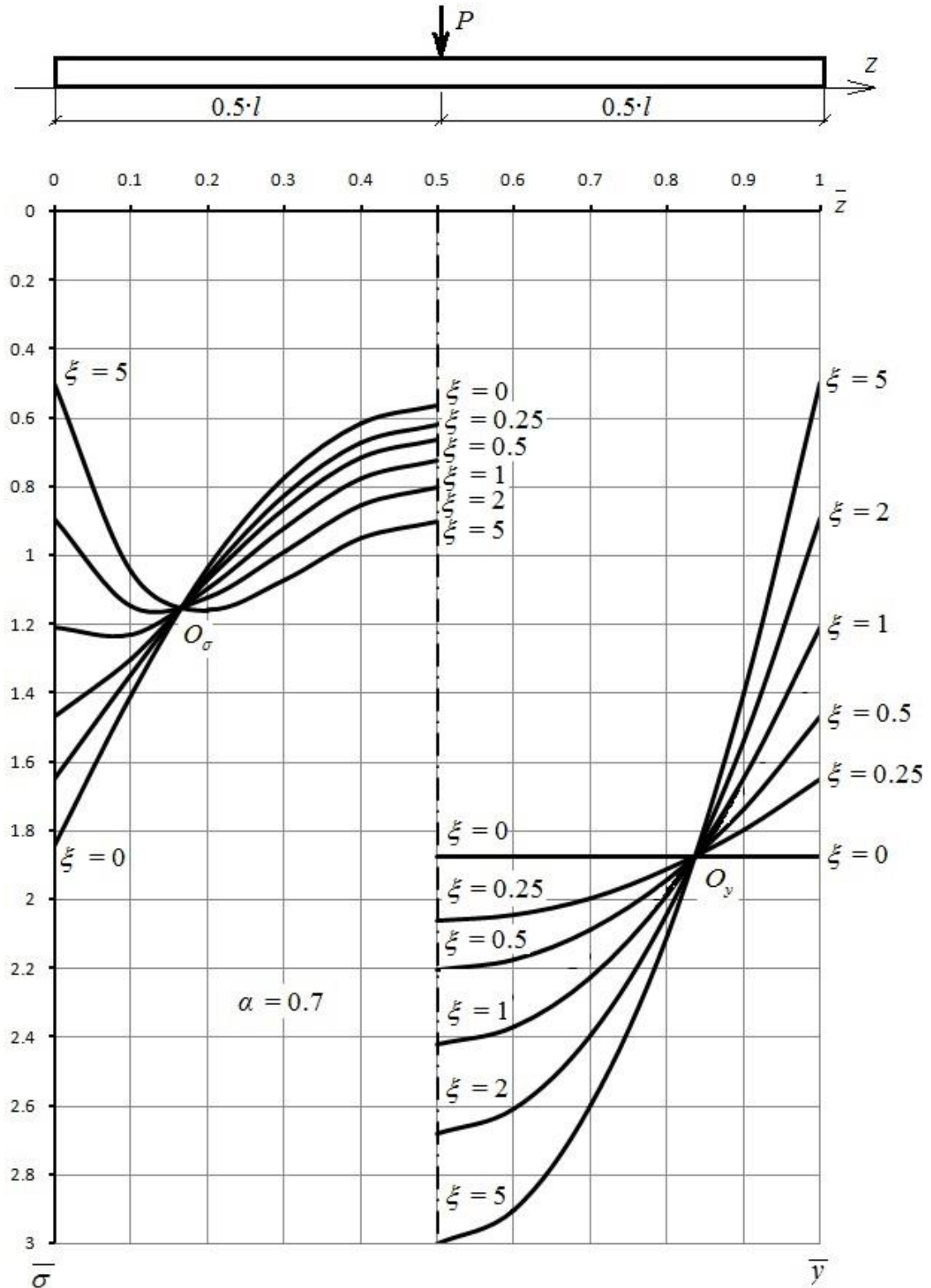


Рис. 2. Розподіл відносних прогинів \bar{y}_z і відпір $\bar{\sigma}_z$ (приклад 1)

1.2. Максимальний прогин під кінцями балки

Розрахункову схему балки (стрічки) подамо на рис. 3.

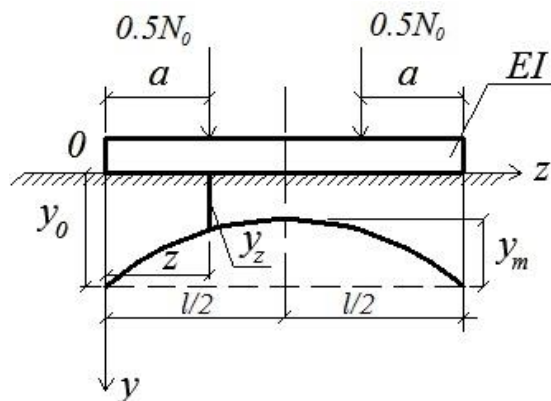


Рис. 3. Розрахункова схема балки з максимальним прогином на кінцях

В цьому випадку формули (2) і (4) змінюються так:

$$y_z = y_0 \cdot [1 - 4 \cdot \xi \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z})], \quad (10)$$

$$\sigma_z = C_0 \cdot y_0 \cdot [1 - 4 \cdot \alpha \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z})] \cdot [1 - 4 \cdot \xi \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z})]. \quad (11)$$

Далі знаходимо

$$\frac{\sigma_z}{C_0 \cdot y_0} = 1 - 4 \cdot \bar{z} \cdot (1 - \bar{z}) \cdot (\alpha + \xi) + 16 \cdot \alpha \cdot \xi \cdot \bar{z}^2 \cdot (1 - \bar{z})^2,$$

а сумарний відпір основи після інтегрування набуває вигляду

$$\int_0^l \sigma_z dz = C_0 \cdot y_0 \cdot l \cdot \left[1 - 4(\alpha + \xi) \cdot \frac{1}{6} + 16 \cdot \alpha \cdot \xi \cdot \frac{1}{30} \right] = \frac{y_0 \cdot C_0 \cdot l}{3} [3 - 2(\alpha + \xi) + 1.6 \cdot \alpha \cdot \xi].$$

Потім з умови $\sum N = 0$ отримаємо

$$y_0 = \frac{1.5}{[(1.5 - \alpha) - \xi \cdot (1 - 0.8 \cdot \alpha)]} \cdot \frac{\sum N_0}{C_0 \cdot l}. \quad (12)$$

Приклад розрахунку 2. Виконаємо розрахунок балки, завантаженої з країв зосередженими силами P (рис. 4, 5). Для порівняння розглянемо два варіанти пружної основи: напівпростір (рис. 4) і напівплощину (рис. 5), приймаючи різні значення коефіцієнтів розподільної здатності $\alpha = 0.5$ і $\alpha = 0.7$ відповідно.

Прогини обчислюються за формулами (10) і (12) при $\sum N = 2 \cdot P$, а напруги – за формулою (11).

2. Жорстка, симетрично навантажена смуга на шарі кінцевої товщини

Приймаємо закон зміни коефіцієнта постелі у вигляді формули (1), тоді розподіл опору під жорстким штампом при осіданні $y_z = y_0$ дорівнює

$$\sigma_z = y_0 \cdot C_0 \cdot \left(1 - \alpha \cdot \sqrt[n]{\sin(\pi \cdot \bar{z})}\right). \quad (13)$$

Щоб обчислити величину $y_0 \cdot C_0$, знайдемо рівнодіючу опору

$$\int_0^l \sigma_z dz = y_0 \cdot C_0 \cdot l \cdot \int_0^1 \left(1 - \alpha \cdot \sqrt[n]{\sin(\pi \cdot \bar{z})}\right) \cdot d\bar{z}. \quad (14)$$

При різних «n» отримаємо

$$\left. \begin{aligned} n=0.5; & \quad \int_0^l \sigma_z dz = y_0 \cdot C_0 \cdot l \cdot (1 - 0.5 \cdot \alpha); \\ n=1; & \quad \int_0^l \sigma_z dz = y_0 \cdot C_0 \cdot l \cdot (1 - 0.6366 \cdot \alpha); \\ n=2; & \quad \int_0^l \sigma_z dz = y_0 \cdot C_0 \cdot l \cdot (1 - 0.7628 \cdot \alpha); \\ n=3; & \quad \int_0^l \sigma_z dz = y_0 \cdot C_0 \cdot l \cdot (1 - 0.8235 \cdot \alpha); \\ n=4; & \quad \int_0^l \sigma_z dz = y_0 \cdot C_0 \cdot l \cdot (1 - 0.8594 \cdot \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

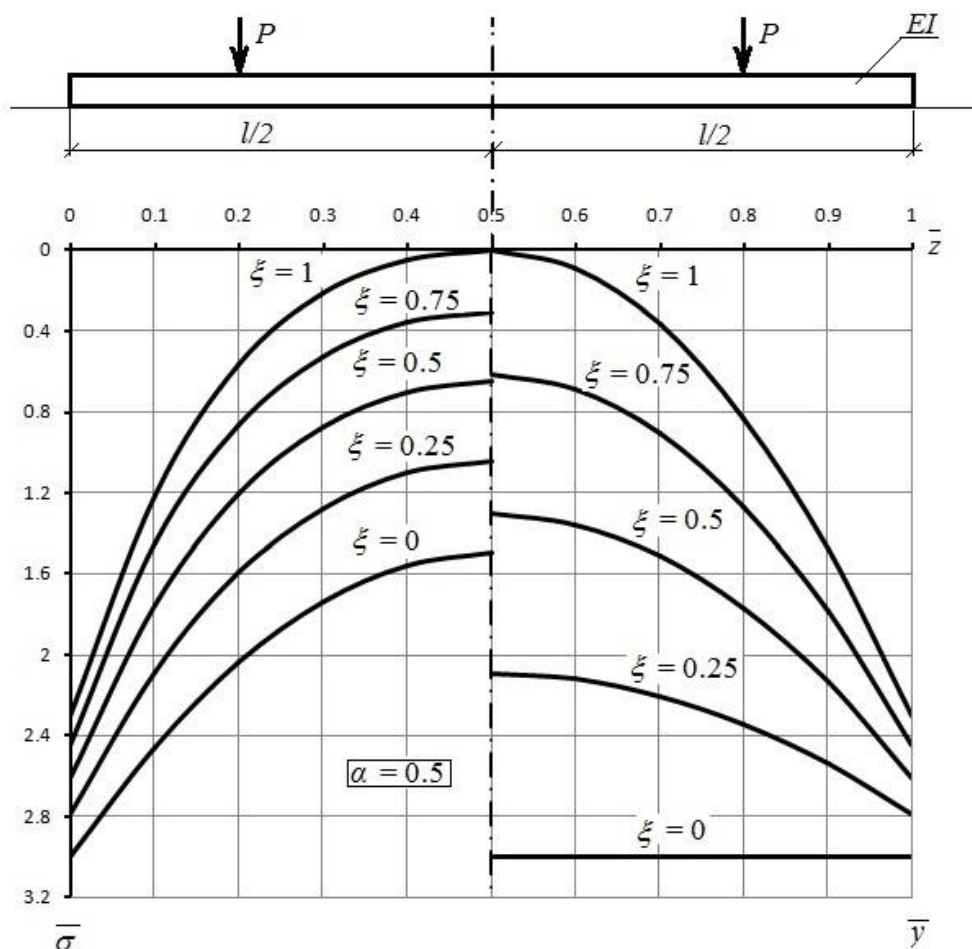


Рис. 4. Розподіл відносних прогинів \bar{y}_z та опір $\bar{\sigma}_z$ (приклад 2 для напівпростору)

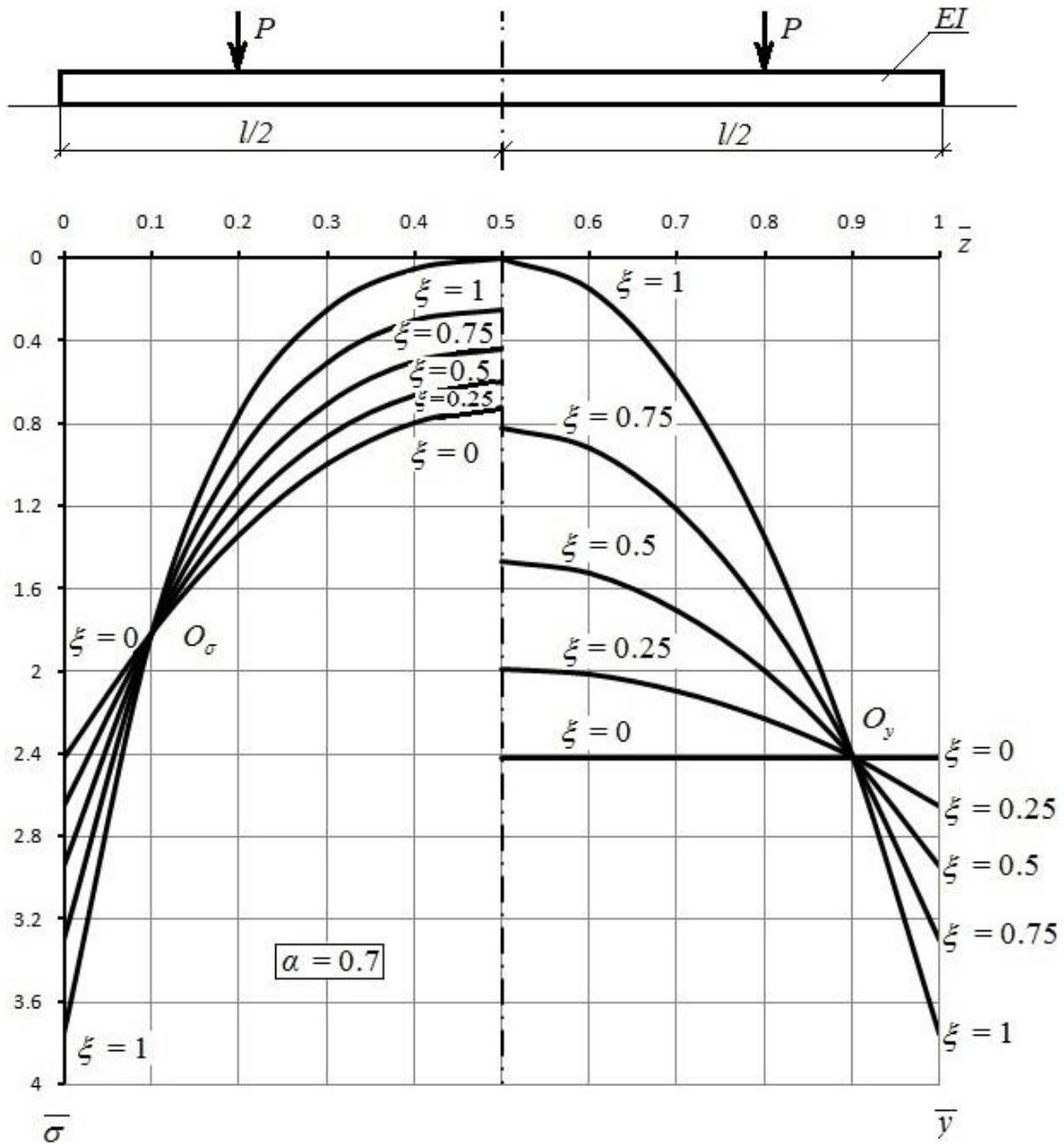


Рис. 5. Розподіл відносних прогинів \bar{y}_z та опір $\bar{\sigma}_z$ (приклад 2 для напівплощини)

Склавши умови рівноваги

$$\int_0^l \sigma_z dz = q \cdot l,$$

знайдемо

$$y_0 \cdot C_0 = \frac{q}{1 - K_n \cdot \alpha}, \quad (16)$$

де

$$K_{0.5} = 0.5; \quad K_1 = 0.6366;$$

$$K_2 = 0.7628; \quad K_3 = 0.8235; \quad K_4 = 0.8594.$$

Тепер запишемо опір основи у відносних величинах

$$\bar{\sigma}_z = \frac{\sigma_z}{q} = \frac{1 - \alpha \cdot \sqrt{\sin(\pi \cdot z)}}{1 - K_n \cdot \alpha}. \quad (17)$$

Скориставшись даними Г. В. Крашениннікової [12] для плоскої

деформації, знайдемо розподіл відпору за формулою (17) з використанням закономірностей (1-а) і (1-б) при двох

значеннях $\alpha=0.4$ та $\alpha=0.75$, відповідно до співвідношення $H/l=0.25$ і $H/l=\infty$.

Результати розрахунку наведемо на рис. 6.

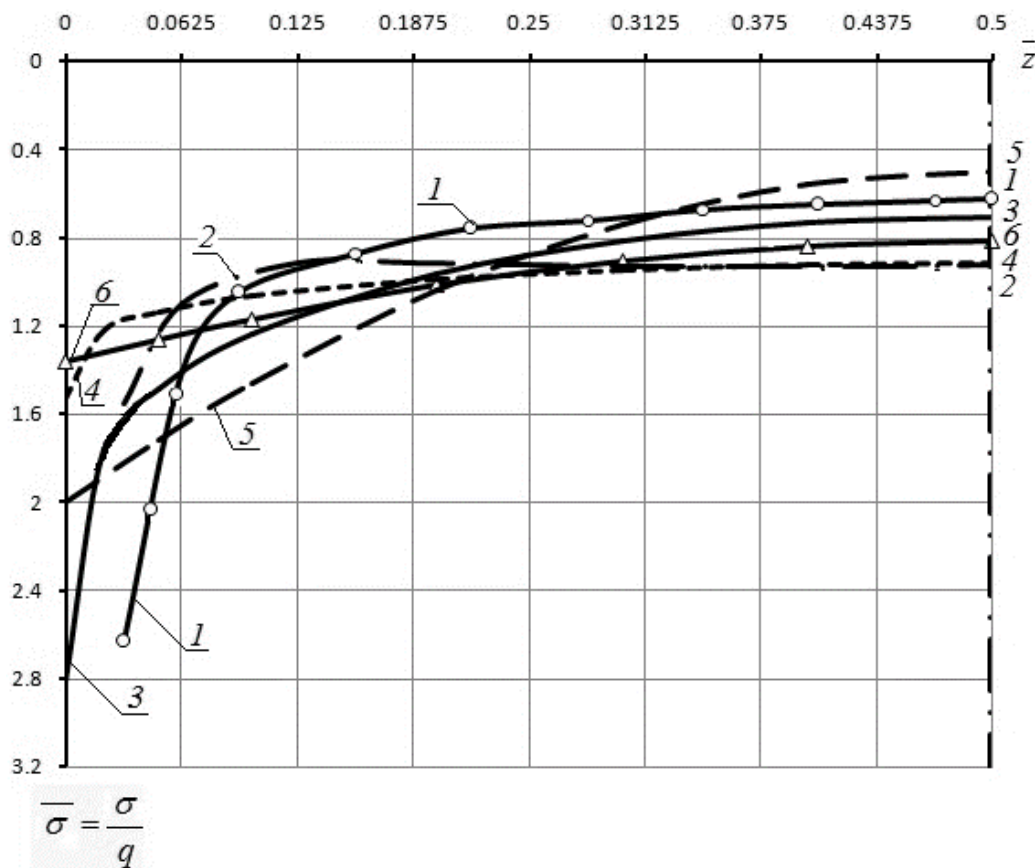


Рис. 6. Епюри опору ґрунту під симетрично звантаженими жорсткими фундаментами (плоска деформація): 1, 3, 5 – $H \rightarrow \infty$ ($\alpha=0.75$); 2, 4, 6 – $H=L/4$ ($\alpha=0.4$); 1, 2 – Г. В. Крашениннікова; 3, 4 – синусоїда; 5, 6 – парабола

Подані на рис. 6 графіки $\overline{\sigma_z}$ наочно показують, що використання функції (1-б) найближче відображує концентрацію опору з країв штампів при великих глибинах кінцевого шару, а використання параболічної залежності (1-а) – при малих глибинах. Цей факт пов'язаний з тим, що функція (1-б) має два керованих параметри – α і n , а функція (1-а) – один параметр – α , що можна продемонструвати на рис. 7, наприклад при $\alpha=0.75$.

Висновки. Подані вище розрахункові підходи можна об'єднати в єдиний «деформаційний» метод, який дозволяє:

- виразити деформацію фундаментної конструкції наближеною (або точною) залежністю, що включає осідання кінців фундаменту і невідомий (або заданий) параметр жорсткості системи «основа-фундамент» ξ ;

- використати довільний закон зміни коефіцієнта жорсткості основи (пропорційності), в тому числі що імітує розподільні властивості існуючих моделей,

які мають розподільні властивості (напівплощина, напівпростір, основа кінцевої товщини та ін.);

– встановити закон зміни опору основи вздовж конструкції; використовуючи умови рівноваги, інтегруванням знайти невідомі переміщення.

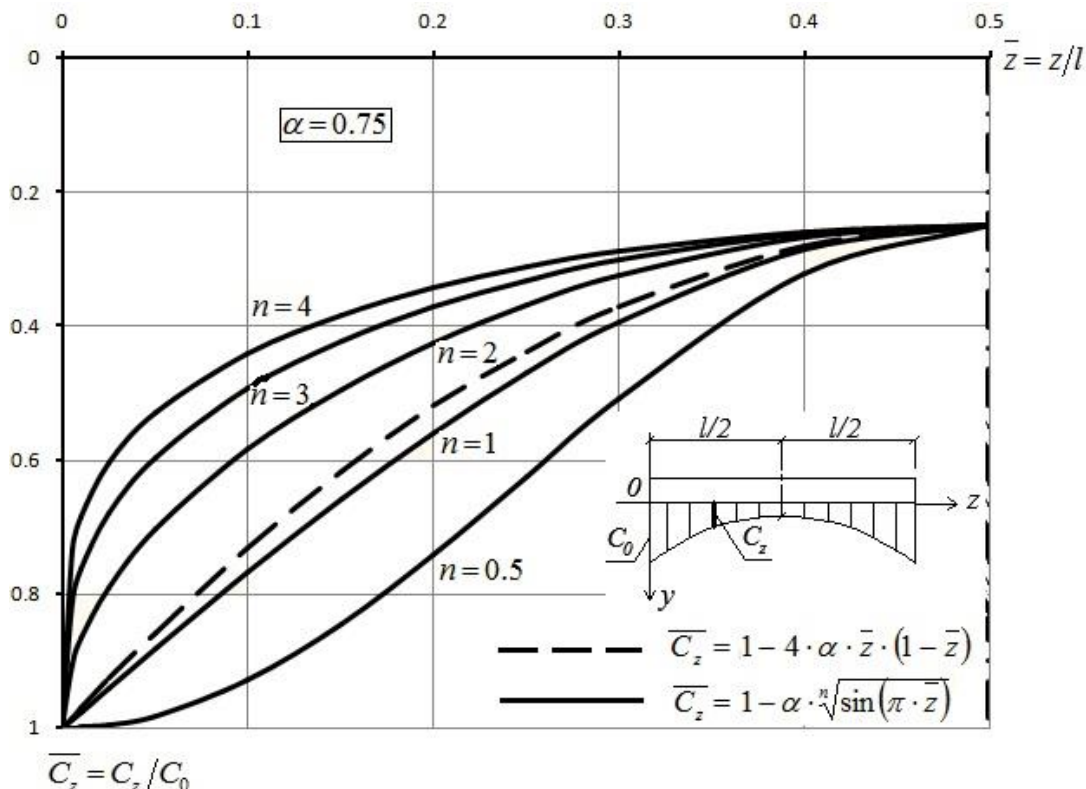


Рис. 7. Порівняння залежностей (1-а) і (1-б) при $\alpha = 0.75$

Список використаних джерел

- Куликов Г., Казьмина А., Кондратьева Н. Взаимосвязь предпроектных исследований и характера реконструкции жилища. *MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture*. Lublin : Polish Academy of sciences, 2011. Т. 13. С. 145–149.
- Novskiy A. V., Bichev I. K., Novskiy V. A., Yeresko E. G., Vivcharuk V. V. Results of determining the deformation characteristics of a limestone-shell rock depending on its anisotropy. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020. No 78, P. 152–158. URL: <http://visnyk-odaba.org.ua/2020-78/19.pdf>.
- Achmus Martin, Thienken Klaus. On the behavior of piles in non-cohesive soil under combined horizontal and loading. *Acta Geotechnica*. 2010. Vol. 5. P. 199-210. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11440-010-0124-1>.
- Maycon Andre de Almeda, Miriam Goncalves, Sidnei Helder Cardoso Teixeira. Horizontal Bearing Capacity of Piles in a Lateritic Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011. January. P. 59–69. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000410>.
- Reese L., Cox W. Analisis of laterally loaded Piles in Sand. *6th Ann. Offshore Technol. Conf.* Houston. Tex., 1974. Vol. 2. P. 473–483.

6. Есакова С. В., Лучковский И. Я. Исследование напряженно-деформированного состояния горизонтально нагруженных моделей свай в песчаном основании. *Науковий вісник будівництва*: зб. наук. праць. 2011. Вип. 65. С. 220–225.

7. Лучковский И., Есакова С. Экспериментальное обоснование расчетной модели горизонтально нагруженных свай с экспоненциальным распределением коэффициента жесткости основания. *MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture*. Lublin: Polish Academy of sciences, 2014. Vol. 16. No 6. С. 109–116. URL: <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-1cd82626-6bc7-4344-ad03-897e2df2a43a/c/14Esakova.pdf>.

8. Флорин В. А. Основы механики грунтов. Ленинград, Москва: Госстройиздат, 1959. Т. 1. 357 с.

9. Штаеман И. Я. Контактные задачи теории упругости. Москва: Гостехиздат, 1949. 270 с.

10. Горбунов-Посадов М. И. Осадки фундаментов на слое грунта, подстилаемом скальным основанием Москва: Госстройиздат, 1946. 60 с.

11. Егоров К. Е. К вопросу деформации основания конечной толщины. *Механика грунтов: сб. тр. НИИОСП*. 1958. Вып. 34. С. 5–33.

12. Крашенинникова Г. В. Расчет балок на упругом основании конечной глубины. Москва, Ленинград: изд-во «Энергия», 1964. 100 с.

13. Лучковский И. Я., Есакова С. В. Применение расчетной модели Б. Н. Жемочкина к расчету поперечно нагруженных свай при нелинейном распределении жесткости грунта по глубине заделки. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА, 2014. Вип. 1 (75). С. 39-44. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Nvb_2014_1_11.pdf.

14. Жемочкин Б. Н., Сеницын А. П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. Москва: Госстройиздат, 1962. 239 с.

15. Алексеев С. И., Камаев В. С. Учет жесткостных параметров зданий при расчетах оснований и фундаментов. *Вестник ТГАСУ*. 2007. № 3. С. 165–172.

16. Барменкова Е. В., Матвеева А. В. Моделирование системы здание-фундамент-основание двухслойной балкой на упругом основании с переменным коэффициентом постели. *Вестник МГУСУ*. 2013, № 10. С. 30–35. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-sistemy-zdanie-fundament-osnovanie-dvuhslonnoy-balkoy-na-uprugom-osnovanii-s-peremennym-koeffitsientom-posteli/viewer>.

Есакова Світлана Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури.

ORCID ID: 0000-0001-6598-5929. E-mail: esakova@ukr.net.

Чепурний Дмитро Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури.

ORCID ID: 0000-0001-9494-9388. E-mail: chepurnoy777@gmail.com.

Купрейчик Анна Юріївна, асистент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. ORCID ID: 0000-0003-3565-7566.

E-mail: a.y.kupreychyk@gmail.com.

Yesakova Svitlana PhD (Tech). Associate Professor, department of geotechnics, underground and hydrotechnical structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture.

ORCID ID: 0000-0001-6598-5929. E-mail: esakova@ukr.net.

Chepurnui Dmitro PhD (Tech). Associate Professor, department of geotechnics, underground and hydrotechnical structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture.

ORCID ID: 0000-0001-9494-9388. E-mail: chepurnoy777@gmail.com.

Kupreychyk Anna, PhD (Tech). Assistant, department of geotechnics, underground and hydrotechnical structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID ID: 0000-0003-3565-7566.

E-mail: a.y.kupreychyk@gmail.com.

Статтю прийнято 21.06.2021 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 528.117

**ВПЛИВ ПОМИЛОК У ВИЗНАЧЕННІ УХИЛУ ТРАСУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ
ГЕОДЕЗИЧНОГО ОБҐРУНТУВАННЯ ТРАСИ**

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, кандидати техн. наук С. М. Камчатна,
Є. Ф. Орел, О. С. Саяпін

**INFLUENCE OF ERRORS IN DETERMINATION OF TRACING SLOPE ON THE
ACCURACY OF GEODETIC BASE FOR ROUTE**

D. Sc. (Econ.) K. Mamonov, PhD (Tech.) S. Kamchatnaya, PhD (Tech.) Y. Orel,
PhD (Tech.) O. Saiarin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242225>

***Анотація.** Накопичення помилок у передачі координат при проектуванні залізничної лінії призводить не тільки до зміни будівельної вартості та обсягів робіт, але й змінює умови проектування ліній і величину експлуатаційних витрат. У статті математично обґрунтовано чинники, які впливають на довжину лінії, що проектується. Встановлено, що вплив помилок у ходах робочого обґрунтування проявляється в розбіжності істинної та запроєктованої протяжності траси. Неврахування цієї помилки призведе до значних перевитрат коштів під час будівництва лінії більшої протяжності, ніж це необхідно.*

***Ключові слова:** геодезичне обґрунтування, ухил трасування, керівний ухил, еквівалентний ухил, точність.*

***Abstract.** The purpose of this article is to study and develop a methodological approach to solving the problem of accuracy of the geodetic base of the route. For this purpose, the following tasks are set: mathematical substantiation the dependence of the line length on the ratio of the trace slope and the guide slope; description of the function of optimal use of the guiding slope at high speed; determination of the impact of errors in the course of the geodetic justification on the route length. Starting from the determined point and further to the right, artificial development of the line is required. Because when a trace is planed using level curves, this point can be reached sooner or later, and in some cases, this point can not be reached not at all, the line length designed according to the plan will be slightly different than in the case of tracing with usage the exact data. Thus, the obtained results indicate the following. If the error positions during a high-speed segment are such that the ordnance datum of the passage is less than the truth, the route length will be less than the true and vice versa. This trivial result indicates that the location of geodetic support points on different sides of the pass is not recommended. It is established that due to the accumulation of errors in the transmission of coordinates in the working substantiation networks, the conditions of the line design and the amount of operating costs change. It is mathematically substantiated that the line length depends on the depth of the excavation on the pass and the height of the embankment at the point, and also on the difference of ordnance datum at these points. The difference between the trace slope and the guiding slope has an inversely proportional effect. In addition, the function of optimal use of the guide slope at a high-speed segment has the form of a broken line according to its fractures the need for artificial development of the route can be established. The influence of errors in the*

course of the working justification is manifested in the discrepancy between the true and projected route length. If this error is not taken into account, it will lead to significant overspending during building a longer line than necessary. Further development of the problem of increasing the accuracy of tracing and reducing the impact of errors is planned in the direction of creating methods of digital modelling and automated programs.

Keywords: *geodetic base, tracing slope, guiding slope, equivalent slope, accuracy.*

Вступ. Сучасний рівень розвитку автоматизованих систем, що застосовуються при проєктуванні залізничної лінії, робить можливим реалізацію проєктів практично будь-якої складності. Це відкриває великі перспективи перед проєктувальниками, даючи змогу знаходити оптимальні рішення при будівництві залізничної лінії із застосуванням методів цифрового моделювання й автоматизованих програм. При цьому розширення технічних можливостей має ґрунтуватися на відповідальному підході до вибору конфігурації траси залізничної лінії, її параметрів у плані й профілі. Це питання дуже важливе й для безпеки руху, і для економічної ефективності проєктів, заснованої на пошуку таких технічних рішень, які забезпечать не тільки оптимальну вартість будівництва, але й не призведуть надалі до підвищення вартості обслуговування залізничної лінії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлення та аналіз профілю дороги є важливими завданнями в інженерних вишукуваннях. У сучасних підходах використовуються бортові лазерні датчики для точного вимірювання змін висоти вздовж визначеного маршруту. Однак тут задіяний складний сенсорний механізм, такий як мобільна система виявлення і визначення дальності, і якість одержуваного зображення погіршується через безліч чинників. Практичний приклад у дослідженні [1] показує, що якість отриманих профілів на основі запропонованого підходу досягає міліметрової точності. Отже, при реалізації пропонованого підходу стає можливим точний і економічний аналіз профілю дороги. Однак, незважаючи на те, що

існуючі методи лазерного сканування ефективні на великих площах, вони неефективні при виявленні змін геометричних елементів і створенні зображень за короткі періоди часу на невеликих площах. Як показало дослідження [2], на невеликих похилих ділянках побудова траси має доволі низьку точність порівняно з плоскими ділянками. Середньоквадратичне відхилення контрольних точок становило $\pm 0,12$ м в горизонтальній площині і $\pm 0,09$ м у вертикальній площині.

Істотним елементом трасування залізничних і автомобільних доріг є ухил проєктної лінії поздовжнього профілю, який визначається відношенням різниці відміток переламів профілю на елементі до його довжини. При проєктуванні нової дороги на карті фіксуються точки, де буде проходити нова дорога. Проєктувальнику дуже важливо знати якомога точніше ухил у кожній такій точці. Ця проблема в [3] була зведена до задачі пошуку відрізка найкоротшої довжини через точку, яка з'єднає дві компланарні лінії. Нахил в точці можна визначити за допомогою двох найближчих до цієї точки кривих рівня. Нахил задається відрізком найкоротшої довжини, який з'єднає дві криві рівня. Оскільки крива рівня складається з послідовних компланарних сегментів прямих ліній, ця задача може бути зведена до знаходження відрізка найменшої довжини, який з'єднає два компланарних відрізки прямих, розташованих на двох послідовних кривих рівня. Помилка визначення ухилу в даному дослідженні не перевищувала 1 %.

У різних геодезичних мережах спостереження виконуються повторно. Ці

спостереження, які називають вихідними спостереженнями, незалежні. На етапі проєктування для підвищення точності можна враховувати або середнє значення помилки вихідних спостережень, або помилку самих вихідних спостережень. Звичайний аналіз помилки заснований на звичайній оцінці методом найменших квадратів, який використовує середнє значення вихідних спостережень. У статті [4] була досліджена ефективність результатів визначення помилки. Для проведення дослідження надійності були спроектовані нівелірна мережа та мережа GPS, і був обчислений середній коефіцієнт успішності методів. Один із методів покращує точність трасування приблизно на 34 % для мережі нівелювання і на 38 % для мережі GPS у порівнянні зі звичайними методами проєктування траси. Стаття [5] описує, як ефективно використовувати геодезичні технології в муніципальному дорожньому будівництві і враховувати помилки топографічної зйомки і картування на ранній стадії будівництва муніципальних доріг.

В основному якість геодезичного трасування залежить від вихідних даних або методів, використовуваних для їх отримання. Однак різні методи просторової інтерполяції, що використовуються для одних і тих самих даних, можуть давати різні результати. У статті [6] порівнюється точність різних методів просторової інтерполяції, таких як IDW, Kriging, Natural Neighbor і Spline. Оскільки інтерполяція важлива при створенні матриці висот, важливо провести порівняльний аналіз таких методів, щоб з'ясувати, який з них дає більш точні результати. Набір даних було взято авторами [6] з аерофотограметричної зйомки. Розрахувавши середню абсолютну помилку і середньоквадратичну помилку, автори виявили, що результати не сильно відрізняються. Однак найбільш точні результати отримано за допомогою методів інтерполяції Spline і Kriging.

У статті [7] пропонується можливість застосування сучасних геодезичних

технологій в суміжних галузях, таких як цивільне будівництво і роботи із створення дорожньої інфраструктури. Ці методи можуть допомогти у визначенні проблем вже існуючих доріг і бути основою планування ремонтно-відновлювальних робіт. При цьому зменшення помилки вимірювань призведе до більшої точності визначення обсягів робіт і знизить їх вартість. Використовуючи ці технології, автори [7] виявили реальні деформації і їх основні причини та тим самим змогли прийняти оптимальне технічне рішення для відновлення конструкції дороги. Щоб підготувати проєкт відновлення існуючої або будівництва нової дороги і робочі креслення, необхідне знання існуючих місцевих об'єктів. Виконання будівництва або реконструкції дороги направлено на використання цифрових моделей рельєфу і допомогу в більш точному проєктуванні, зменшенні впливу на навколишнє середовище і оптимізації робіт. Однак через надлишкові точки висоти для автоматичного створення та проєктування моделі рельєфу ресурси можуть використовуватися нерационально. Методика, подана в статті [6], може бути придатною для усунення зайвих точок вимірювання висоти, утримуючи їх в певних положеннях рельєфу.

У дорожніх проєктах виникають труднощі з нанесенням точок дотику розрахованої вертикальної кривої, точки повороту і проміжних точок через відмінності в масштабі по горизонталі і вертикалі. Ця проблема викликана тим фактом, що пропорційне співвідношення між двома різними масштабами невідомо для довжини з певним ухилом в поздовжньому профілі [8]. Метою [9] було показати, що обстеження місцевості дає найкращі результати з використанням інтегрованих методів вимірювання (класична зйомка і лазерне сканування LiDAR). Стаття [9] містить порівняння результатів досліджень, отриманих з використанням даних LiDAR, з даними, отриманими в результаті прямих

вимірювань. Проведені дослідження показали деякі обмеження методу отримання даних від LiDAR. Це пов'язано з тим, що метод не дає змоги визначати координати точок вимірювання, які описують топографію в місцях, не доступних для лазерного променя. Підсумовуючи вищезазначені джерела, з'ясовано, що до переваг усіх згаданих методів належать міліметрова точність і можливість обробки великих масивів даних. У той же час є деякі недоліки, наприклад, ці засоби неефективні при виявленні змін геометричних елементів і створенні зображень протягом коротких періодів часу на невеликих ділянках або на невеликих похилих ділянках, які мають доволі низьку точність в порівнянні з плоскими ділянками. При цьому якість результату погіршується через безліч чинників. Також автори не досліджують математичну залежність величини похибки від різних чинників. Отже, одним з актуальних завдань є підвищення точності класичної зйомки для таких місць.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даної публікації є

дослідження і розробка методологічного підходу до вирішення проблеми точності побудови геодезичного обґрунтування траси. Для цього поставлено такі завдання: математично обґрунтувати залежність довжини лінії від співвідношення ухилу трасування й керівного ухилу; описати функцію оптимального використання керівного ухилу на напруженому ході; визначити вплив помилок в ходах робочого обґрунтування на протяжність траси.

Основна частина дослідження.

Розглянемо випадок, коли пункти геодезичного обґрунтування розташовані по різні боки подоланого перевалу. На рис. 1 зображено істинний профіль місцевості АСВ, отриманий у результаті точних наземних робіт, наприклад, у результаті прокладання ходу геометричного нівелювання, і профіль місцевості АС'В, побудований за планом в горизонталях. Точки А і В є пунктами основного геодезичного обґрунтування, визначені з точністю, що дає змогу не враховувати помилки вихідних даних. Положення точки С' під С показано умовно.

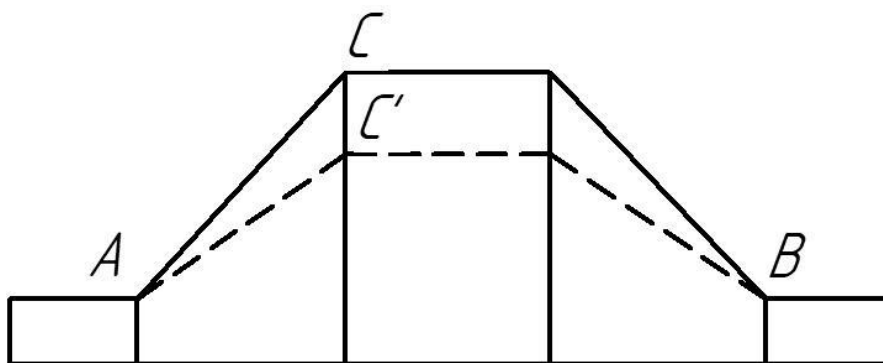


Рис. 1. Профіль місцевості

Позначимо керівний ухил як i_k й еквівалентний ухил від опору на кривих як $i_{ек}$, тоді ухил трасування $i_{тр}$ буде дорівнювати керівному ухилу, який пом'якшено на кривих ділянках на величину $i_{ек}$

$$i_{тр} = i_k - i_{ек}. \quad (1)$$

Позначимо відмітки точок А, В, С, С' відповідно $H_A, H_B, H_C, H_{C'}$. При подальших розрахунках будемо вважати, що величина $H_C - H_{C'}$ досить мала і не впливає на вибір кратності тяги. Розрахунок спростимо і будемо його вести для одиночної тяги. Припустимо, що на ділянках АС і СВ

природний ухил місцевості $i_{пр}$ більше i_k , тоді довжина лінії, наприклад, на ділянці АС визначиться за формулою

$$S_{AC} = \frac{H_c - H_c - h_b - h_H}{i_k - i_{ек}}, \quad (2)$$

де h_b и h_H – глибина виїмки на перевалі й висота насипу в точці А, м.

Маємо

$$\Delta' S = S_{AC'} = S_{AC} = \frac{H_{c'} - H_c - (h'_b - h_b)C - (h'_H - h_H)A}{i_k - i_{эк}}, \quad (4)$$

для відрізка траси СВ.

$$\Delta'' S = \frac{H_{c'} - H_c - (h''_b - h_b)C - (h''_H - h'_H)B}{i_k - i_{ек}}. \quad (5)$$

Для попередніх висновків величина $i_{ек}$ для обох відрізків траси АС і СВ прийнята однаковою. Якщо відволіктися від спеціальних умов, на підставі яких можуть бути обрані при проектуванні висота насипу й глибина виїмки, а взяти до уваги тільки умови найкращого використання керівного

При цьому припускаємо, що висота насипу в точці А не може змінити умов трасування (збільшити довжину лінії) при підході до А зліва. Аналогічно можна записати

$$S_{AC'} = \frac{H_{c'} - H_A - h_b - h'_H}{i_k - i_{ек}}. \quad (3)$$

ухилу на напруженому ході і враховуючи (3), то

$$h_b + h_H = \varphi(H_c - H_A; S) \quad (6)$$

і функція φ має задовольняти такі умови:

$$i_{тр} \geq i_{пр}, \quad \varphi=0;$$

$$i_{тр} < i_{пр} \leq i_{тр} + \frac{20}{S_0}, \quad \frac{d\varphi}{d(H_c - H_A)} = const; \quad (7)$$

$$i_{пр} > i_{тр} + \frac{20}{S_0}, \quad \frac{d\varphi}{d(H_c - H_A)} = 0, \quad h_b + h_H = 20 \text{ м},$$

де S_0 – найкоротша відстань між А й С.

У загальному вигляді функція може бути подана графіком, показаним на рис. 2.

Починаючи від точки $i_{тр} + \frac{20}{S}$ і далі вправо, потрібен штучний розвиток лінії. Оскільки при трасуванні за планом в горизонталях вихід на цю точку може настати раніше або пізніше необхідного моменту, а в деяких випадках і зовсім не настати, то і довжина лінії, запроєктована за планом, буде мати дещо іншу величину, ніж

у випадку трасування за точними даними. Таким чином, отримані результати свідчать: якщо при трасуванні на напруженій ділянці положення помилок в ходах робочого обґрунтування таке, що відмітка перевалу виходить менше істинної, то довжина траси буде менше істинної і навпаки. Цей результат говорить про те, що розташування точок геодезичної опори з різних боків перевалу не може бути рекомендовано.

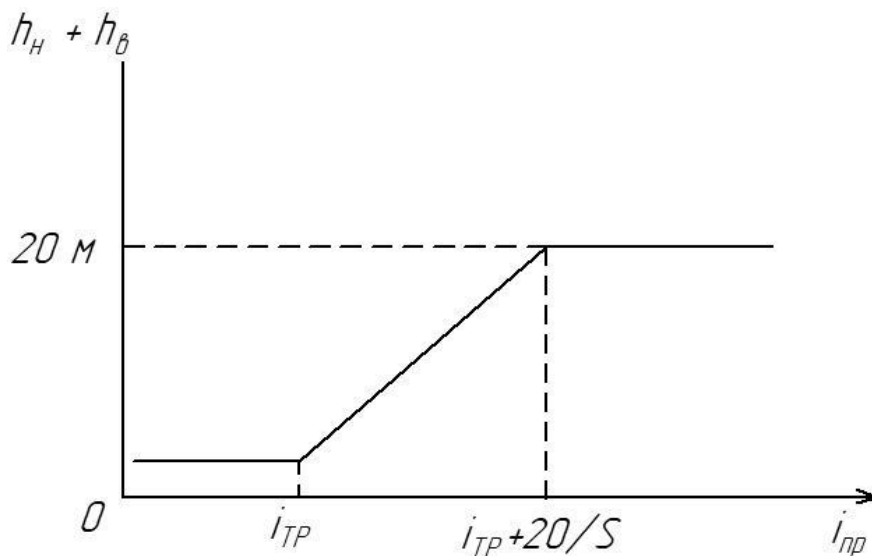


Рис. 2. Графічна залежність між висотою насипу й глибиною виїмки та ухилом траси

Висновки. Встановлено, що через накопичення помилок у передачі координат у мережах робочого обґрунтування змінюються умови проектування лінії і величина експлуатаційних витрат. Математично обґрунтовано, що довжина лінії залежить прямо пропорційно не тільки від глибини виїмки на перевалі й висоти насипу в точці, але й від різниці відміток у цих точках. Обернено пропорційний вплив має різниця між ухилом трасування й керівним ухилом. Крім того, функція оптимального використання керівного ухилу на напруженому ході має вигляд

ламаної лінії, за переламаними якої може бути встановлено необхідність штучного розвитку траси. Вплив помилок у ходах робочого обґрунтування проявляється в розбіжності істинної та запроєктованої протяжності траси. Неврахування цієї помилки призведе до значних перевитрат коштів під час будівництва лінії більшої протяжності, ніж це необхідно. Подальший розвиток проблеми підвищення точності трасування та зменшення впливу помилок планується в напрямку створення методів цифрового моделювання й автоматизованих програм.

Список використаних джерел

1. Han J.-Y., Chen A., Lin Y.-T. Image-Based Approach for Road Profile Analyses. *Journal of Surveying Engineering*. American Society of Civil Engineers. 2016. Vol. 142 (1). P. 06015003. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000160](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000160) (last access: 12.04.2021).
2. Park J. H., Lee W. H. Orthophoto and DEM Generation in Small Slope Areas Using Low Specification UAV. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*. 2016. Vol. 34 (3). P. 283–290. URL: <https://doi.org/10.7848/KSGPC.2016.34.3.283> (last access: 12.04.2021).
3. Deaconu O., Deaconu A. Numerical methods to find the slope at a point on map using level curves. Application in road designing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 789. P. 012017. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012017>. (last access: 12.04.2021).

4. Erdogan B., Durdag U. M., Hekimoglu S. Efficacy of the conventional deformation analysis based on different strategies on the design stage of the network. *Survey Review*. 2020. Vol. 52 (372). P. 278–286. URL: <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1553009>. (last access: 12.04.2021).
5. Dainian J. Surveying and mapping technology in urban road engineering construction. *Geomatics Observation*. 2020. Vol. 2 (2). P. 49–59. URL: <https://doi.org/10.35534/go.0202010c>. (last access: 12.04.2021).
6. Ajvazi B., Czimmer K. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study. *Geodesy and Cartography*. 2019. Vol. 45 (1). P. 43–48. URL: <https://doi.org/10.3846/gac.2019.7921>. (last access: 12.04.2021).
7. Herban I. S., Vilceanu C.-B., Grecea C. Road-Structure Monitoring with Modern Geodetic Technologies. *Journal of Surveying Engineering*. 2017. Vol. 143 (4). P. 05017004 URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000218](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000218) (last access: 12.04.2021).
8. Ince H., Erdem N. A method for drawing vertical curve in longitudinal profile in road project. *Survey Review*. 2018. Vol. 51 (368). P. 413–421. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2018.1470071>. (last access: 12.01.2021).
9. Kotlarz P., Siejka M., Mika M. Assessment of the accuracy of DTM river bed model using classical surveying measurement and LiDAR: a case study in Poland. *Survey Review*. 2020. Vol. 52 (372). P. 246–252. URL: <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1696515>. (last access: 12.04.2021).

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економ. наук, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com, тел.: (099) 291-73-54, ORCID 0000-0002-0797-2609.
Камчатна Світлана Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com, ORCID 0000-0001-5711-4146.
Орел Євген Федорович, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-70. E-mail: orel@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-6261-1558.
Саяпін Олександр Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-70. E-mail: sayapin09@ukr.net.

Mamonov Kostiantyn, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Land Administration and GIS O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. Tel.: (099) 291-73-54.
Kamchatnaya Svitlana, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel. (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com.
Orel Yevhen, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel. (057)730-10-70. E-mail: orel@kart.edu.ua.
Saiapin Oleksandr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel. (057)730-10-70. E-mail: sayapin09@ukr.net.

Статтю прийнято 20.05.2021 р.

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 620.22

ОПАНУВАННЯ ПРОЦЕСІВ СИНТЕЗУ ОКСИДНИХ СПОЛУК З ЗАСТОСУВАННЯМ ПОТУЖНОГО ДЖЕРЕЛА ШВИДКОГО НАГРІВУ ВИХІДНИХ ІНГРЕДІЄНТІВ

Канд. техн. наук В. О. Чишкала, доктори техн. наук С. В. Литовченко, Е. С. Геворкян, канд. техн. наук В. П. Нерубацький, асп. О. М. Морозова

MASTERING THE PROCESSES OF SYNTHESIS OF OXIDE COMPOUNDS WITH THE USE OF A POWERFUL SOURCE OF FAST HEATING OF THE INITIAL INGREDIENTS

PhD (Tech.) V. O. Chyshkala, D. Sc. (Tech.) S. V. Lytovchenko, D. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, postgraduate student O. M. Morozova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242226>

Анотація. Реалізовано методику електронно-променевого нагрівання суміші оксидів ітрію та цирконію для синтезу складних оксидів. Вихідна суміш містила інгредієнти у кількості, що відповідає сполуці $Y_2Zr_2O_7$. Суміш нагрівали у танталовому контейнері майже до температури плавлення танталу (2915 С). Високу температуру процесу забезпечено застосуванням системи з плазмовим емітером електронів. Метою вакуумного високотемпературного впливу на порошкову суміш була реалізація умов, достатніх для ініціювання реакцій синтезу складних оксидів. Аналіз отриманих зразків зафіксував після первинної високотемпературної обробки фазу типу флюориту $(Y, Zr)O_x$ з параметром ґратки 5,2 Å та технологічні домішки оксиду танталу. Після додаткового відпалу у повітрі при 1200 С протягом 7 год було зафіксовано ще фазу з параметром ґратки 5,17 Å, а також домішки оксиду танталу. Апробовані умови синтезу призводять до утворення багатоелементних оксидів зі структурою лише флюориту, пірохлорної фази у спеках не виявлено.

Ключові слова: багатокомпонентні оксиди, пірохлори, флюорит, ультра- та нанодисперсні порошки, електронно-променевий нагрів, компактування, спікання.

Abstract. The creation of new materials with predetermined properties is perhaps the most important issue and problem of modern materials science. Increasingly harsh conditions for the use of materials in modern, and especially - promising technological processes, the need to ensure and implement the safest conditions for humanity and the environment of modern industrial production, the importance and increasing role of economic factors – all these factors necessitate improving known and creating new materials, as well as technologies for their production and use. Further economically justified, socially attractive and technologically safe use of nuclear technologies and operation of modern complex technical facilities, which undoubtedly include nuclear power devices, further development of nuclear and in the future thermonuclear energy is impossible without modernization.

The article implements the method of electron beam heating of a mixture of yttrium and zirconium oxides for the synthesis of complex oxides. The initial mixture contained ingredients in an amount corresponding to the compound $Y_2Zr_2O_7$. The mixture was heated in a tantalum container almost to the melting point of tantalum (2915 C). The high temperature of the process is provided by the use of a system with a plasma electron emitter. The purpose of the vacuum high-temperature effect

on the powder mixture was to implement conditions sufficient to initiate reactions for the synthesis of complex oxides. The analysis of the obtained samples recorded after the initial high-temperature treatment a fluorite-type phase (Y, Zr) O_x with a lattice parameter of 5.2 Å and technological impurities of tantalum oxide. After additional annealing in air at 1200 C for 7 hours, another phase with a lattice parameter of 5.17 Å was recorded, as well as impurities of tantalum oxide. The tested synthesis conditions lead to the formation of multi-element oxides with a structure of only fluorite, pyrochlore phase in the heat is not detected.

Keywords: multicomponent oxides, pyrochlores, fluorite, ultra- and nanodispersed powders, electron beam heating, compaction, sintering.

Вступ. Створення нових матеріалів з наперед заданими властивостями є чи не найважливішим питанням і проблемою сучасного матеріалознавства. Все жорсткіші умови використання матеріалів у сучасних, а особливо – перспективних технологічних процесах, необхідність забезпечення та реалізації максимально безпечних для людства та довкілля умов функціонування сучасного промислового виробництва, вагомість та підвищення ролі економічних чинників – все це фактори, що зумовлюють необхідність удосконалення відомих і створення нових матеріалів, а також технологій їхнього виробництва та використання [1, 2].

Подальше економічно виправдане, соціально привабливе та технологічно безпечне використання ядерних технологій та функціонування сучасних складних технічних об'єктів, до яких, беззаперечно, належать ядерні енергетичні пристрої, подальший розвиток ядерної та в перспективі термоядерної енергетики неможливі без модернізації відомих і створення нових паливних та конструкційних матеріалів активної зони ядерних реакторів [3, 4]. Стандартна технологія електронно-променевого нагрівання реалізує умови, за яких в матеріалі утворюється високий температурний градієнт від ділянки, на якій безпосередньо сфокусований електронний пучок, вглиб матеріалу. Такі умови обробки є причиною утворення сильно неоднорідних структур, гомогенність яких підвищують багаторазовим плавленням зі зміною точки, боку та поверхні фокусування пучка. Ця в

підсумку досить тривала сумарна обробка в багатьох випадках супроводжується суттєвою зміною складу оброблюваного матеріалу через часткове випаровування елементів з найнижчими температурами плавлення та кипіння, а також меншою енергією пароутворення. Реальна розробка матеріалів з заданими властивостями і впровадження таких матеріалів у технологічні процеси неможливі без побудови повної та завершеної схеми причинно-наслідкового зв'язку понять у колі «склад – структура – властивості», без фундаментальних знань про чинники зовнішнього впливу (радіаційного, корозійного, термічного, механічного), що ініціюють ті або інші структурно-фазові перетворення твердотільних об'єктів та формування нових станів структури на різних ієрархічних рівнях від атомарного до макроскопічного. Дослідженням окремих питань перелічених проблем приділено досить багато уваги [5, 6]. Зокрема, є позитивні результати використання оксидних нанопорошків для зміцнення конструкційних матеріалів [7, 8], хоча залишаються невирішеними проблеми на всіх ланках технології – від виготовлення оксидної складової та безпосередньо сталі, що зміцнена оксидами, до оптимізації структурно-фазового стану всіх цих матеріалів [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Крім створення конструкційних матеріалів з підвищеною радіаційною стійкістю для теплових реакторів серед перспектив розвитку ядерної енергетики є інший важливий

напрямок – перехід до використання реакторів на швидких нейтронах, для ефективної та довготривалої надійної роботи яких необхідно підвищити ступінь вигорання палива до 18...20 % без зниження параметрів теплоносія. Такі реактори також потребують матеріалів, що матимуть у порівнянні з уже впровадженими матеріалами кращі якості з погляду на радіаційне розпухання, радіаційну повзучість, високотемпературне та низькотемпературне радіаційне окрихчення та радіаційну стабільність структури при нейтронному опроміненні [2]. Необхідні властивості можуть бути реалізовані саме в ДЗО-сталях (дисперсно-зміцнюючих оксидів) [10, 11], що демонструють відмінну радіаційну стійкість в порівнянні з іншими традиційними жароміцними сталями і аустенітними сталями, внаслідок чого є перспективними матеріалами для внутрішньокорпусних елементів теплових реакторів, оболонок твелів реакторів на швидких нейтронах, надкритичних реакторів з водою під тиском, а також першої стінки термоядерних реакторів. Наночастинки оксидів, які дисперговані в об'ємі ДЗО-сталей, виконують низку важливих функцій. По-перше, ці частинки є певним бар'єром для вільного руху дислокацій і міграції границь зерен, що сприяє збільшенню межі міцності при розтягненні і покращує опір повзучості. По-друге, оксидні частинки забезпечують ефективне поглинання індукованих опроміненням дефектів (вакансій і міжвузловинних атомів). По-третє, на цих частинках реалізується спрощений процес утворення зародків пухирців гелію, що пригнічує сам процес утворення пухирців і таким чином забезпечує підвищену стійкість до опромінення [12]. Все зазначене підвищує стабільність структурних елементів матеріалу під опроміненням, а отже, покращує радіаційну стійкість матеріалу [13, 14].

Проблема створення ДЗО-сталей з покращеними властивостями є складовою

загальної проблеми створення гетерогенних твердих тіл з заданими властивостями, що забезпечуються реалізацією необхідного структурно-фазового стану як складових елементів, так і всього об'єкта. З урахуванням цього особливого значення набувають дослідження всіх етапів утворення таких матеріалів – від початкового формування дисперсних складових до реалізації бажаного структурно-фазового стану всього композиту [15, 16]. Було проведено дослідження процесів синтезу і структурно-фазової перебудови в керамічних та металокерамічних сполуках різного складу і ступеня складності – від простих подвійних сполук, зокрема звичайних оксидів перехідних металів [17, 18], до багатоелементних та багатофазових композицій різної архітектури – об'ємних композитів [19], шаруватих структур [20], консолідованих [21] та компактованих [22] матеріалів. Накопичено певний досвід досліджень синтезу оксидних сполук у вигляді ультрадисперсних [23] та нанодисперсних [24] порошків, вивчення структурно-фазових перетворень в них при компактуванні [25] та консолідації [26].

Таким чином, з проведеного огляду можна зробити висновок, що питання синтезу оксидних сполук з застосуванням потужного джерела швидкого нагріву вихідних інгредієнтів є невирішеним.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження процесів ініціювання реакцій синтезу складних оксидних сполук з застосуванням потужного джерела електронно-променевого нагрівання вихідних інгредієнтів у кількості $Y_2Zr_2O_7$.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– досягти температури, за якої починається інтенсивне виділення пари та газів, над контейнером утворювалась область іонної плазми, світіння якої можна було спостерігати та контролювати візуально;

– удосконалити технологію високо-енергетичного термічного впливу на вихідну порошкову суміш для суттєвого покращення контролю температури процесу.

Основна частина дослідження. На першій стадії підготовки зразків вихідні промислові порошки ZrO_2 та Y_2O_3 брали у співвідношенні 1:1 (атомні відсотки) і перемішували у міксері протягом 2...8 год. Після гомогенізації суміші її компактували у таблетки на механічному пресі в сталевій прес-формі у повітрі при надлишковому тиску до 1,2 ГПа, після чого таблетки піддавали термообробці (початковій консолидації спіканням) для забезпечення певної механічної міцності та запобігання руйнуванню при подальшій обробці. Температуру і тривалість спікання експериментально обирали найменшими для запобігання фазовим перетворенням у компактах. Після цього зразки вміщували у танталовий контейнер-корзину та фіксували в вакуумному пристрої для подальшого високотемпературного впливу. Оціночні розрахунки, виконані з урахуванням реальної геометрії пристрою, показали, що для проведення синтезу високотемпературних сполук при температурах до 3000 С при площі поверхні контейнера 3...5 см² і ефективності відбиття інфрачервоних дзеркал на рівні 40 % (частка енергії, що повертається) розрядний струм має перевищувати величину 2 А при напрузі 150 В і більше. Конструкція пристрою передбачає можливість використання двох режимів напуску газу: безпосередньо у вакуумну камеру або в область термокатоду. Попередні експерименти з оптимізації робочого режиму пристрою показали, що робочий тиск при напуску робочого газу в камеру треба підтримувати на рівні величини $1,2 \cdot 10^{-3}$ Тор, а при напуску в область термокатоду – $3,5 \cdot 10^{-4}$ Тор. Напруженість магнітного поля у максимумі в обох випадках напуску газу має становити величину 450 Е. Відстань від контейнера до вихідного отвору плазмового джерела не має перевищувати 20 см. Забезпечення

робочого режиму починали з процесу збудження магнітного поля, для чого через відповідний блок живлення подавали струм 15 А, який відповідав напруженості магнітного поля максимум на рівні 450 Е.

Наступним кроком було розігрівання термокатода, яке реалізовували при прямому пропусканні струму через нього внаслідок вивільнення теплоти Джоуля. В процесі розігрівання катода враховували зміну електричного опору катода зі зростанням його температури і відповідною зміною кількості вивільненої теплоти, а також поступове зростання витрат енергії на випромінювання та емісію з катода. Оскільки струм емісії термокатода визначається його температурою (тобто відповідним струмом через катод) для запобігання перегорянню вольфрамового дроту катода електричні параметри розряду також збільшували поступово, починаючи зі стартової розрядної напруги у 100 В. Струм через катод поступово збільшували до утворення початкового стабільного струму розряду. В подальшому продовжували повільно збільшувати струм розжарювання катода до досягнення необхідного розрядного струму на рівні 0,5...1 А. При цьому струм розжарювання становив 35...37 А. Продовжуючи збільшення струму розжарювання катода, струм розряду доводили до рівня 2 А, а розрядну напругу тримали на рівні 200 В. Після досягнення стабільного режиму плазмового струменя подавали електроживлення на контейнер. В процесі розігрівання зразка напруга на контейнері становила 1 кВ, а струм сягав 100 мА.

Після досягнення температури, за якої починалось інтенсивне виділення пари та газів, над контейнером утворювалась область іонної плазми, світіння якої можна було спостерігати та контролювати візуально (рис. 1). Світіння мало синій колір, що зумовлено відповідним іонним та елементним складом газоплазмового середовища. Тривалість високотемпературної витримки в експериментах складала 5 хв.

Після цього на тиглі вимикали розрядну напругу, плавно зменшували струм розжарювання до повного вимкнення, вимикали магнітне поле і перекривали потік робочого газу. Система витримувалась при

залишковому тиску 5 хв для охолодження зразка, після чого у герметизовану від насосів камеру напускали повітря та вилучали зразок.



Рис. 1. Зображення області світіння біля високотемпературного контейнеру в процесі інтенсивного енергетичного впливу

Структурно-фазовий стан зразків досліджували на електронному мікроскопі JEOL JSM-7001F SEM з отриманням зображень мікроструктури (рис. 2) і картографії (рис. 3), а також на рентгенівських дифрактометрах ДРОН-2.0 і ДРОН-4-07.

Для спрощення аналізу отримані зображення наведено в одному масштабі.

Отримані дані свідчать, що вихідні порошки оксидів цирконію та ітрію перемішані добре. Зони наявності цих елементів практично збігаються (рис. 3, а, б, в). На зламі спостерігаються виділення тільки оксиду танталу (рис. 3, г).

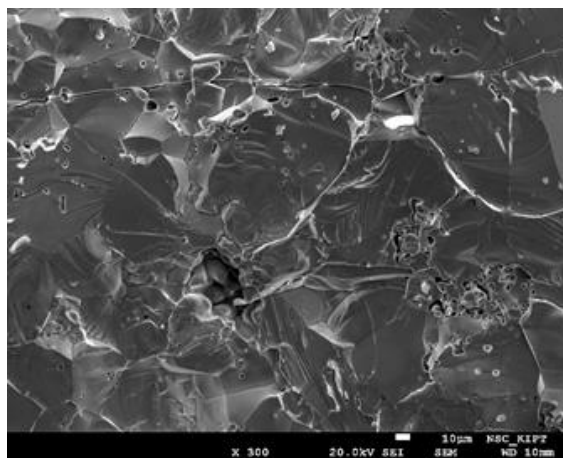


Рис. 2. Мікроструктура ділянки зламу зразка після плавлення, на якій аналізували елементний склад

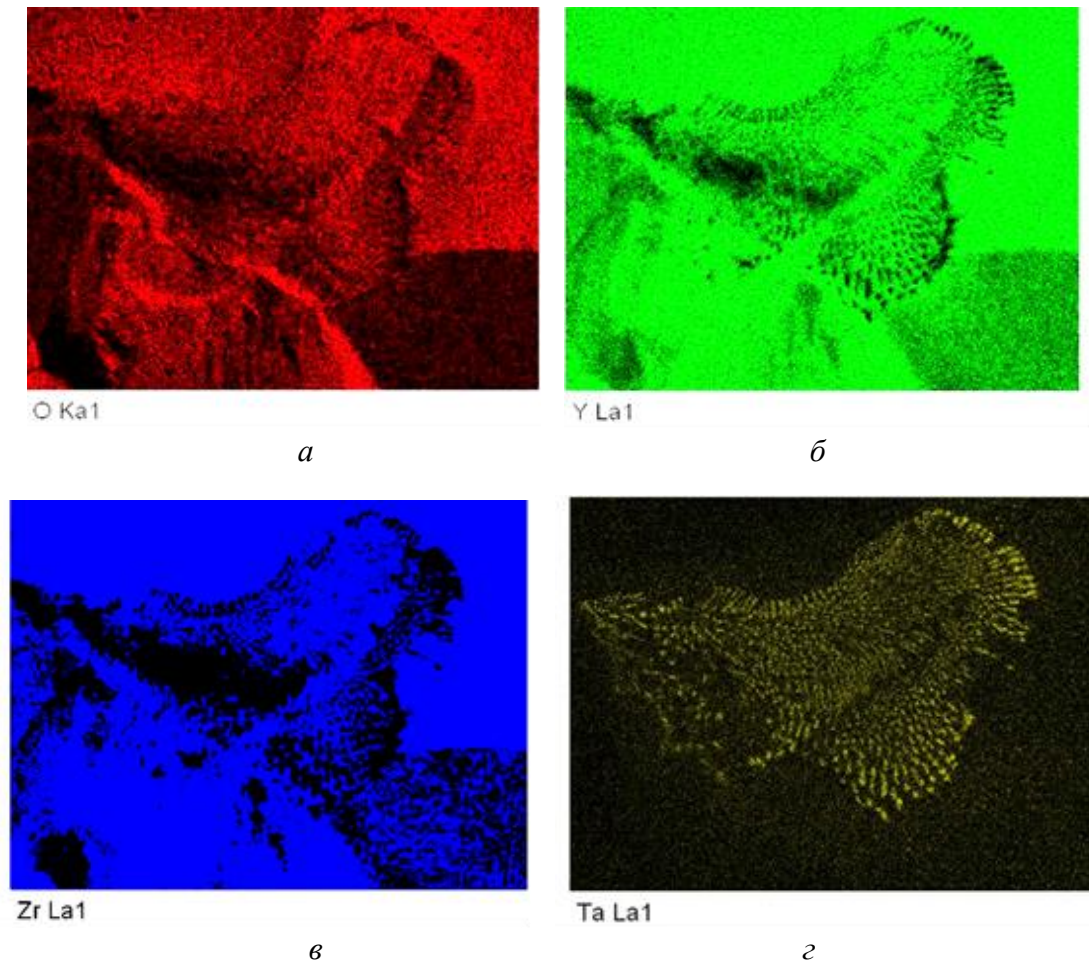


Рис. 3. Розподіл елементів по поверхні зламу зразка після плавлення:
a – кисень; *б* – ітрій; *в* – цирконій; *г* – тантал

Структуру отриманого сплаву подано в основному великими зернами 100 мкм, що є характерним для плавлених керамік (рис. 4),

хоча частину об'єму складають зерна меншого розміру.

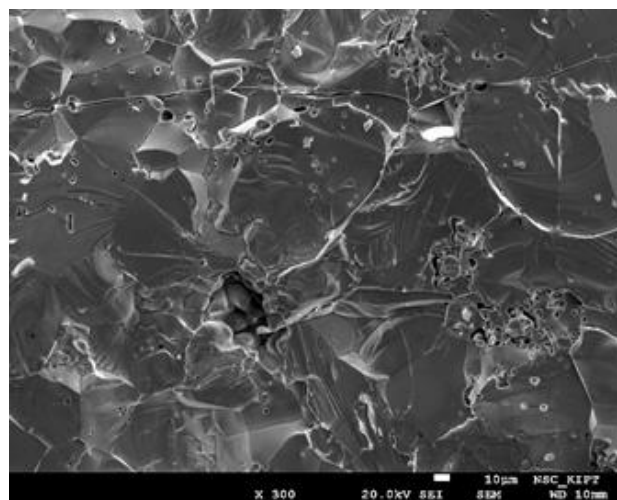


Рис. 4. Мікроструктура зламу плавленого зразка

При великих збільшеннях помітні виділення оксиду танталу, який не розчиняється в суміші оксидів при

кристалізації розплаву та в окремих ділянках виділяється у вигляді регулярно розподілених волокон (рис. 5).

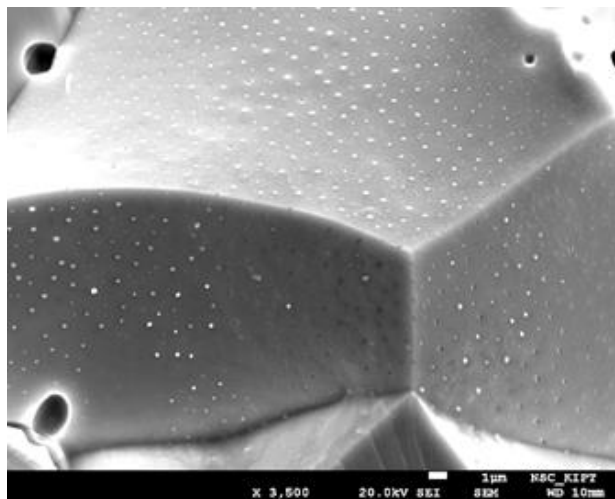


Рис. 5. Поверхня зламу плавленого зразка з виділеннями Ta_2O_5

Якісний фазовий аналіз проводився за даними картотеки міжнародної бази даних ICDDPDF-2. Кількісний фазовий аналіз зразків та визначення параметрів решітки фаз проводився за методом Ритвельда.

На дифрактограмі зразка (рис. 6) виявлено лінії двох фаз – флюориту ($(Y, Zr) O_x$) та оксиду танталу (підкладинка). Параметр ґраток флюориту становить $a = 5,206 \text{ \AA}$.

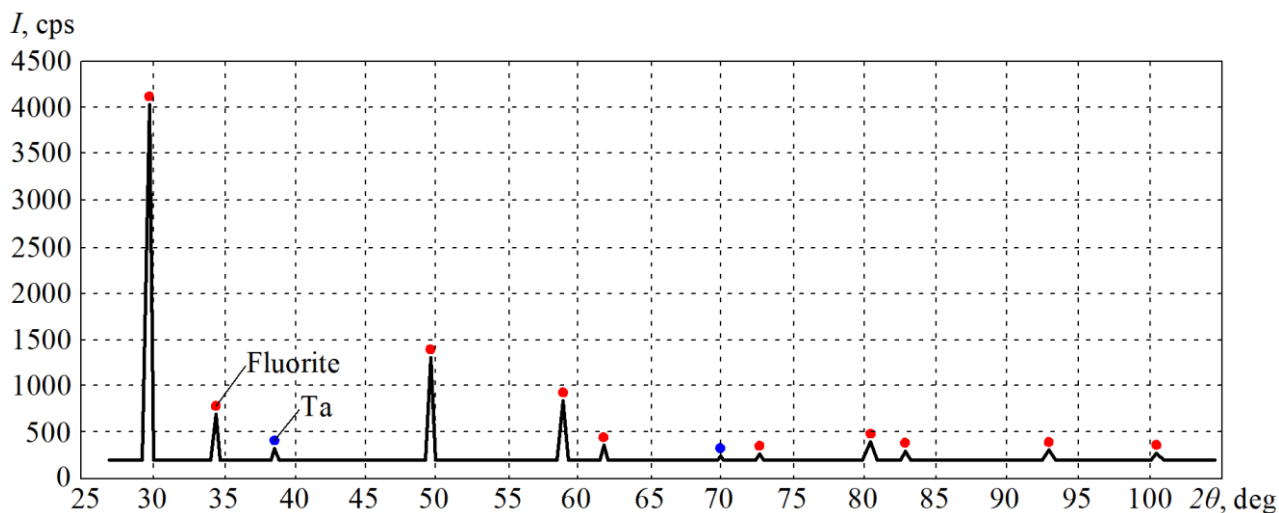


Рис. 6. Елемент дифрактограми плавленого зразка

За даними елементного аналізу (табл. 1) співвідношення оксидів Y і Zr в

сплаві приблизно відповідає вихідній суміші (в межах похибки приладу).

Таблиця 1

Розподіл елементів на поверхні зламу плавленого зразка

Елемент	Масовий %	Атомний %
O	26,85	67,95
Y	38,36	17,47
Zr	30,85	13,69
Ta	3,95	0,88

Додатковий відпал при 1200 °C протягом 7 год не призвів до утворення у спеках фази пірохлору. Зафіксовано лише дві

фази флюориту з параметрами ґраток 5,2 Å і 5,217 Å відповідно та фазу оксиду танталу (табл. 2, рис. 7).

Таблиця 2

Фазовий склад поверхні зламу плавленого зразка після додаткового відпалу

Фаза	Вміст, мас. %	Параметри ґраток, Å
Флюорит 1	48,6	5,2
Флюорит 2	30	5,217
β -Ta ₂ O ₅	21,4	a = 43,966; b = 3,889; c = 6,189

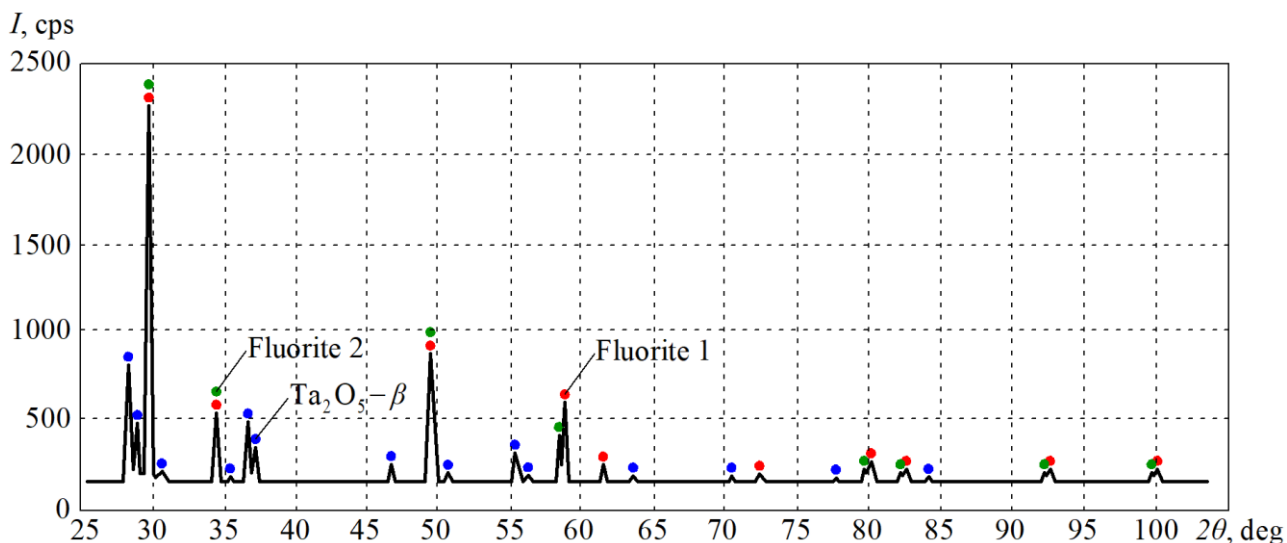


Рис. 7. Дифрактограма плавленого зразка після додаткового відпалу

Аналіз отриманих даних свідчить, що застосована технологія плавлення суміші оксидів призводить до формування флюоритних фаз. Фаза зі структурою пірохлору, формування якої є привабливішим через кращу структурну сумісність з Fe, не зафіксована у кінцевому

матеріалі навіть після додаткової термообробки. Причиною цього можуть бути кращі термодинамічні характеристики і стабільність флюоритних фаз, що утворюються з суміші випробуваного складу, у порівнянні з аналогічними

показниками пірохлорних фаз, синтез яких є потенційно можливим.

Можна припустити, що для синтезу фази пірохлору необхідно виконання низки умов, зокрема можна виділити такі:

– на основі аналізу фазових діаграм стану необхідно чітко визначити інтервал складів, де можливе існування пірохлорної фази, та відповідно до цих даних готувати суміші оксидів;

– гомогенізацію вихідної суміші оксидів необхідно проводити у високоенергетичному млинці, що сприятиме зменшенню температури і тривалості процесу синтезу складних оксидних сполук, в тому числі з бажаною структурою пірохлору;

– технологію високоенергетичного термічного впливу на вихідну порошкову суміш необхідно удосконалити для суттєвого покращення контролю температури процесу;

– у технології високоенергетичного термічного впливу необхідно передбачення керованої зміни складу зразка внаслідок випаровування елементів, без чого неможливе коректне визначення вихідного складу сумішей.

Зазначимо, що виконання першої умови ускладнено реалізацією в експерименті сильно нерівноважних умов, які зазвичай призводять до дуже суттєвого спотворення традиційних рівноважних діаграм стану.

Друга умова, яка пропонує вже досить стандартну технологію механоактивованого

синтезу, є зрозумілою і такою, що може бути реалізована. Останні дві умови пов'язані з подальшим удосконаленням методики інтенсивного термічного впливу, що може бути виконаним при продовженні досліджень.

Висновки. Нагрівання суміші оксидів Y_2O_3 та ZrO_2 до 2915 С з подальшим оплавленням призводить до синтезу гомогенного складного потрійного оксиду зі структурою флюориту. Для досягнення стабільного режиму плазмового струменя треба подавати електроживлення на контейнер. Завдяки цьому в процесі розігрівання зразка напруга на контейнері становила 1 кВ, а струм сягав 100 мА.

Застосовано технологію плавлення суміші оксидів, яка призводить до формування флюоритних фаз. Фаза зі структурою пірохлору, формування якої є привабливішим через кращу структурну сумісність з Fe, не зафіксована у кінцевому матеріалі навіть після додаткової термообробки. Встановлено, що додатковий відпал плавлених зразків при температурі 1200 С протягом 7 год в повітрі не призводить до утворення інших фаз, зокрема зі структурою пірохлору. На відміну від низькотемпературних методів синтезу складних сполук після оплавлення за випробуваною технологією у зразків зафіксовано чисту фазу флюориту без домішок вихідних оксидів.

Список використаних джерел

1. Shi W.-Q., Yuan L.-Y., Li Z.-J., Lan J.-H. Nanomaterials and nanotechnologies in nuclear energy chemistry. *Radiochimica Acta*. 2014. Vol. 100. P. 727–736.
2. Vityaz P. A., Svidunovich N. A., Kuiz D. V. Nanomaterials science: textbook. *Manual*. 2015. 387 p.
3. Voevodin V. N., Neklyudov I. M. Evolution of the structural-phase state and radiation resistance of structural materials. *Naukova Dumka*. 2006. 376 p.
4. Kalin B. A., Platonov P. A., Chernov I. I., Shtrombach Ya. I. Physical materials science: textbook for universities. In 6 volumes. *Volume 6. Part 1. Structural materials of nuclear technology. MEPHI*. 2008. 672 p.
5. Bai X.-M. Efficient Annealing of Radiation Damage Near Grain Boundaries via Interstitial Emission. *Science Mag*. 2010. Vol. 27. P. 1631–1634.

6. Allen G. B., Kerr M. Measurement and modeling of strain fields in zirconium hydrides precipitated at a stress concentration. *J. Nucl. Mater.* 2012. Vol. 430. P. 27–36.
7. Yurechko M., Schroer C. Creep-to-rupture of 12Cr- and 14Cr-ODS steels in oxygen-controlled lead and air at 650 °C. *J. Nucl. Mater.* 2014. Vol. 450. P. 88–98.
8. Skuratov V. A., Sohatsky A. S., O'Connell J. H. Swift heavy ion tracks in $Y_2Ti_2O_7$ nanoparticles in EP450 ODS steel. *J. Nucl. Mater.* 2015. Vol. 456. P. 111–114.
9. Gill J. K., Pandey O. P., Singh K. Role of sintering temperature on thermal, electrical and structural properties of $Y_2Ti_2O_7$ pyrochlores. *Int. J. Hydr. En.* 2011. Vol. 36. 14943.
10. Liu C., Yu C., Hashimoto N., Ohnuki S., Ando M., Shiba K., Jitsukaw S. Micro-structure and microhardness of ODS steels after ion irradiation. *J. Nucl. Mater.* 2011. Vol. 417. P. 270–273.
11. Yamashita S., Akasaka N., Ukai S., Ohnuki S. Microstructural development of a heavily neutronirradiated ODS ferritic steel (MA957) at elevated temperature. *J. Nucl. Mater.* 2007. P. 202–207.
12. Bryk V. V., Voevodin V. N., Matvienko B. V., Neklyudov I. M., Platonov P. V. Structural and phase changes in steel Kh16N15M3B upon irradiation with charged particles. *VANT. FRP and RM series.* 1983. Vol. 5 (28). P. 12–21.
13. Parshin A. M. Structural transformations and radiation swelling of alloys. *VANT. FRP and RM series.* 1980. Vol. 4. P. 20–29.
14. Bryk V. V., Voyevodin V. N., Zelensky V. F., Neklyudov I. M., Parshin A. M. Point defect recombination enhanced as solid solution decomposer under irradiation. *Symposium on the effect of radiation on materials.* 1988. 125 p.
15. Litovchenko S. High-temperature silicides: properties and application. *East Eur. J. Phys.* 2016. Vol. 3, No. 3. P. 4–24.
16. Litovchenko S. V., Chishkala V. A., Burkovskaya V. V. Influence of consolidation conditions on thermophysical properties of silicides of refractory metals. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Topic. issue "Chemistry, Chemical Technology and Ecology".* 2013. Vol. 64 (1037). P. 84–92.
17. Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Gutsalenko Yu., Melnik O., Voloshyna L. Examination of patterns in obtaining porous structures from submicron aluminum oxide powder and its mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020. Vol. 6, No. 108. P. 41–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216733.
18. Gevorkyan E. S., Rucki M., Kagramanyan A. A., Nerubatskiy V. P. Composite material for instrumental applications based on micro powder Al_2O_3 with additives nano-powder SiC. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.
19. Azarenkov N. A., Litovchenko S. V., Beresnev V. M., Chishkala V. A., Veliev Yu. I. Condensation of silicide films from pure components. *VANT. Series: Vacuum, pure materials, superconductors (20).* 2014. Vol. 1, No. 89. P. 180–183.
20. Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Morozova O. M. Structural phase processes in multicomponent metal ceramic oxide materials based on the system Y–Ti–Zr–O (Y_2O_3 – TiO_2 – ZrO_2). *SWorldJournal.* 2021. Issue 7. Part 1. P. 17–32. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-07-01-008.
21. Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Gutsalenko Yu. H., Morozova O. M. Some features of ceramic foam filters energy efficient technologies development. *Modern engineering and innovative technologies.* 2020. Issue 14. Part 1. P. 46–60. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-14-01-014.
22. Pogrebnyak A. D., Azarenkov N. A., Beresnev V. M., Lytovchenko S. V. Manufacturing Nano-structures. Chapter 11. Influence of deposition parameters on the structure and properties of

nitride coatings. *University of Central Lancashire (UK), One Central Press (OCP)*. 2014. P. 294–317.

23. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. Моделювання процесу гарячого пресування Al_2O_3 при прямому пропусканні змінного електричного струму з частотою 50 Гц. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 110. С. 45–52.

24. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. До питання отримання тонкодисперсних структур з нанопорошків оксиду алюмінію. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 111. С. 151–167.

25. Геворкян Э. С., Нерубацкий В. П., Мельник О. М. Горячее прессование нанопорошков состава $ZrO_2-5\%Y_2O_3$. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 119. С. 106–110.

26. Gevorkyan E., Rucki M., Sałaciński T., Siemiątkowski Z., Nerubatskyi V., Kucharczyk W., Chrzanowski Ja., Gutsalenko Yu., Nejman M. Feasibility of cobalt-free nanostructured WC cutting inserts for machining of a TiC/Fe composite. *Materials*. 2021. Vol. 14, Issue 12. DOI: 10.3390/ma14123432.

Чишкала Володимир Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (097) 242-05-56. E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Литовченко Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (050) 694-33-21. E-mail: s.lytovchenko@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0002-3292-5468.

Геворкян Едвін Спартакович, д-р техн. наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Морозова Оксана Миколаївна, аспірантка кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Chyshkala Volodymyr Oleksiyovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (097) 242-05-56. E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Lytovchenko Serhii Volodymyrovych, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (050) 694-33-21. E-mail: s.lytovchenko@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0002-3292-5468.

Gevorkyan Edwin Spartakovych, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Morozova Oksana Mykolaivna, Postgraduate, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Статтю прийнято 22.04.2021 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.4.023.14

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ СПРАЦЮВАННЯ КУЗОВІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, канд. техн. наук А. В. Труфанова, асп. М. О. Сергієнко

ANALYSIS OF PECULIARITIES OF PASSENGER CAR BODY WEAR

D. Sc. (Tech.) I. Martynov, PhD (Tech.) A. Trufanova, postgraduate student M. Sergienko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242250>

Анотація. У статті розглянуто питання аналізу особливостей зносу кузовів пасажирських вагонів. Вибірку пасажирських вагонів складають моделі, розроблені та виготовлені ще у 70–80-х роках минулого століття, основу якого складають вагони, успадковані Україною ще від колишнього СРСР. Проведено порівняльний аналіз величини та характеру спрацювання конструктивних елементів вагонів різних типів та років їх побудови. Результати дослідження дали змогу розглянути питання подальшого використання пасажирських вагонів, які найбільш уражені корозією.

Ключові слова: пасажирський вагон, спрацювання, рухомий склад, корозія, інвентарний парк, технічний стан.

Abstract. The article considers the issues of analysis of the patterns of operation of the load-bearing elements of the body of carriage. A comparative analysis of the size and nature of the operation of structural elements of carriages of different types and years of their construction.

In recent years, there has been a significant aging of the operational fleet of carriage. At nowadays, carriages of various models and their modifications with an extended service life, which is approaching the limit, are in operation on the railway network of Ukraine.

The technical, economic and ecological indicators of transport, the degree of reliability and traffic safety depend on the age of the carriages. At nowadays, the level of development of technical means and technology of repair and restoration of rolling stock is increasing fast.

To increase the competitiveness of rail passenger transport, it is necessary to overcome the high degree of wear of the carriages fleet of JSC «Ukrzaliznytsia». Because of the lack of domestic and the complete absence of foreign investment in the railways, the tendency to increase physical depreciation and obsolescence of fixed assets is progressing. According to the data of the branch of «Passenger Company» JSC «Ukrzaliznytsia» in 2020 the inventory includes is almost 5 thousand carriages, most of which have served their intended service life. As a result, the current wear of the carriages fleet is approaching 92 %.

Most of the carriages fleet was built in the 70s and 90s of the last century at car plants in Germany and Russia. Due to the constant lack of funding, the fleet of carriages of JSC «Ukrzaliznytsia» was renewed at a slow pace. Every year the carriages fleet wears out and ages. This reduces the competitiveness of railways, which negatively effects on quantity of passenger traffic. Naturally, carriages should not only create the necessary level of comfort, but also ensure traffic safety and high reliability in operation. The results of the study made it possible to consider the issue of further use of carriages, which are most affected by corrosion.

Keywords: body of a passenger wagon, rollingstock, corrosion, passenger wagon, inventory park, technical condition.

Вступ. За останні роки через недостатню кількість внутрішніх та повну відсутність зовнішніх інвестицій на залізницях України спостерігається тенденція до збільшення як фізичного зносу, так і морального старіння основних фондів. Стосовно пасажирського господарства це означає значне старіння експлуатаційного парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця».

Переважна частина парку пасажирських вагонів була збудована у 70–90 роках минулого століття на вагонобудівних заводах Німеччини (Waggonbau Ammendorf) та Російської Федерації (Калінінський вагонобудівний завод, нині Твер). Згідно з даними філії «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця» більшість вагонів інвентарного парку відпрацювала свій призначений термін служби. В результаті на теперішній день знос парку пасажирських вагонів наближається до 92 %.

Вітчизняне пасажирське вагонобудування з'явилося лише у 2000-х роках завдяки зусиллям ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод». Але через постійну нестачу фінансування парк пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця» оновлювався незначними темпами. Тому актуальним питанням для збільшення конкурентоспроможності залізничних пасажирських перевезень є подолання високого ступеня зношеності парку пасажирських вагонів.

Від віку вагонів залежать техніко-економічні та екологічні показники транспорту, ступінь надійності та безпеки руху. Глибока модернізація з продовженням терміну служби пасажирських вагонів, що проводиться АТ «Укрзалізниця», полягає в повній заміні інтер'єру, заміні електротехнічних пристроїв (генераторів, електропроводки), систем обслуговування і життєдіяльності, а також в повному розбиранні кузова, його дефектоскопіюванні та частковій заміні на ньому металевих конструкцій. Після такої

модернізації умовно відновлюють первинні техніко-експлуатаційні характеристики вагона. Однак треба розуміти, що повністю відновити їх неможливо, тому вимоги до модернізованого складу знижені. Термін експлуатації такого вагона не має перевищувати 10–12 років. При цьому експлуатаційні витрати в порівнянні з новим рухомим складом у нього збільшені.

Тому проведення порівняльного аналізу закономірностей спрацювання несучих елементів рам та кузовів пасажирських вагонів різних типів є своєчасним та актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження несучої здатності кузовів пасажирських вагонів та визначення його залишкового ресурсу присвячено ряд публікацій як в нашій країні, так і за її межами. Так, в роботі [1] наведено результати дослідження залишкового ресурсу несучих конструкцій пасажирських вагонів, що вже відпрацювали свій ресурс. Авторами запропоновано виконувати вибіркове обстеження кузова в трьох зонах, що дає змогу при обмеженій вибірці замірів оцінити загальний технічний стан кузова вагона.

У публікації [2] подано методику прогнозування залишкової здатності кузовів пасажирських вагонів та управління відновленням їх ресурсу. Запропонована методика прогнозування базується на моделі швидкісних корозійних пошкоджень для різних ділянок кузова, що дає змогу виконувати імітацію технічного стану вагона в будь-який момент часу можливість за допомогою методу скінченних елементів оцінити його залишкову несучу здатність. У статті [3] наведено дослідження впливу терміну експлуатації пасажирських вагонів на величину корозійних пошкоджень металоконструкції кузовів. У роботі [4] наведено науково-технічне обґрунтування можливості продовження терміну служби пасажирських вагонів після капітально-відновлювального ремонту (КВР).

Дослідженням сучасного стану парку пасажирських вагонів власності АТ Укрзалізниця присвячені статті [5, 6, 7]. В роботі [5] проаналізовано стан парку пасажирських вагонів та зроблено висновок про необхідність негайного оновлення пасажирського рухомого складу. У роботах [6, 7] розглядаються питання технічного стану вузлів пасажирських вагонів різних років побудови та наведені результати аналізу величини зносів та пошкоджень вагонів в експлуатації.

У статті [8] запропоновані організаційно-технічні рішення щодо удосконалення системи ремонту пасажирських вагонів після продовження терміну їх експлуатації. Аналізуючи результати обстеження технічного стану вагонів, на підставі результатів теоретичних та економічних розрахунків запропоновано декілька варіантів подовження терміну експлуатації пасажирських вагонів.

Автори публікації [9] пропонують методику прогнозування безпеки пасажирського залізничного рухомого складу, яка заснована на методі математичного моделювання з використанням відомих програмних систем.

У роботах [10, 11] виконана оцінка аварійності та надані пропозиції щодо модифікації залізничного пасажирського вагона. Автори, використовуючи метод скінченних елементів, виконали моделювання зіткнення пасажирського вагона з жорсткою стінкою. На першому етапі аналізу було визначено структурні слабкості вихідної конструкції. На наступному етапі автори запропонували модифіковану конструкцію пасажирського вагона. В результаті була отримана конструкція вагона з кращими аварійними властивостями, при якій навколо зіткнення виникають пластичні деформації.

Підсумовуючи результати наведеного вище аналізу, необхідно зазначити, що майже всі проаналізовані роботи спрямовані на дослідження впливу величини зносу на міцність несучих конструкцій кузова

пасажирського вагона та прогнозування можливості продовження ресурсу вагонів. Питання порівняльного аналізу закономірностей спрацювання несучих елементів рам та кузовів пасажирських вагонів різних типів залишились поза увагою дослідників. Це дасть змогу у подальшому спрогнозувати зменшення залишкового ресурсу пасажирських вагонів та більш ефективно планувати заходи для відновлення їх працездатності.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи полягає в аналізі особливостей спрацювання кузовів пасажирських вагонів. Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання: розглянути результати технічного діагностування пасажирських вагонів, що вичерпали свій ресурс, а також за допомогою методів математичної статистики провести аналіз величини спрацювання несучих поверхонь елементів конструкції та проаналізувати їх закономірності.

Основна частина дослідження. На етапі дослідження технічного стану кузова пасажирського вагона було розглянуто близько 540 вагонів різного діапазону як за роками побудови, так і за їх типами. Основний масив вихідних даних склали результати обстеження двох типів вагонів: жорсткі купейні моделей 47Д, 47К, збудовані на заводі Waggonbau Ammendorf (Герліц, Німеччина), та некупейні відкритого типу (плацкарт) моделей 61–425, 61–821, збудовані на Калінінському вагонобудівному заводі.

Діагностування вагонів, що вичерпали призначений термін служби (який складає 28 років) було здійснене в обсязі обстеження їх технічного стану і контрольних випробувань металоконструкцій рам і кузовів, надресорних балок і рам візків вагонів відповідно до «Методики технічного діагностування пасажирських вагонів, що виступили призначений термін, з метою його продовження» ЦЛ-0070, затвердженої наказом Укрзалізниці

№ 304-Ц від 25 червня 2008 року [12, 13]. Вимірювання величини зносів проводилися фахівцями ДП УкрНДІВ у рамках співробітництва з АТ «Укрзалізниця».

Під час обстеження технічного стану вагонів наявність тріщин, зламів, обривів, вм'ятин, зношування, деформацій, слідів ремонту, корозійних пошкоджень, зміни геометричних форм елементів кузова і рами вагона, надресорної балки і рами візка визначалися шляхом візуального огляду з наступним вимірюванням товщин. Вимірювання відбувається за допомогою ультразвукового товщиноміра «Булат-1S» з діапазоном вимірювання 0,8–200 мм та похибкою 0,01 мм. Наявність несправностей або слідів ремонту, фактичні товщини основних несучих елементів кожного вагона реєструвалися в картах технічного стану. Перерізи для вимірювання товщин вибиралися виходячи з припущення, що товщини в такому перерізі є мінімальними для даного елемента вагона, як правило, внаслідок корозійного пошкодження. Номінальні значення товщин елементів визначені за робочими кресленнями заводу-виробника. При обстеженні технічного стану вагонів використовувалися схеми

жорсткого купейного та відкритого (плацкартного) пасажирських вагонів.

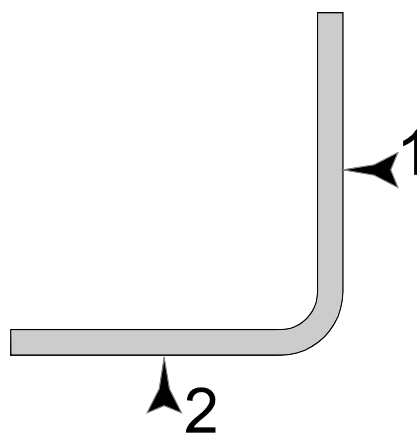
Вагони були розбиті на три умовні групи: вагони з терміном експлуатації 35–40 років, 41–45 років та понад 45 років. У наведеному матеріалі подано ілюстрації найбільш характерних розподілень спрацювань елементів пасажирських вагонів. Під час обробки даних використовувалися відомі методи математичної статистики [14], які реалізовані в пакеті програм обробки даних Microsoft Excel. При цьому порівнювалися номінальні значення товщини конструктивних елементів вагона та фактичні значення товщини з урахуванням величини зносу.

Нижня обв'язка. У вагонах вимірювання величини зносу нижньої обв'язки проводилися по всіх зазначених точках (рис. 1) як з лівої сторони, так і з правої сторони вагона. Схему вимірювання величини зносу нижньої обв'язки подано на рис. 1.

У вагонів відкритого типу максимальне значення спрацювання було виявлено зі сторони робочого тамбура в точці 2–4,5 мм, це приблизно складає 32 % зносу від номінальної товщини металу, яка дорівнює 14 мм.



а



б

Рис. 1. Схема проведення вимірювань нижньої обв'язки:

а – нижня обв'язка вагона з точками вимірювання; б – схема вимірювання

У вагонах відкритого типу з терміном служби до 35 років математичне очікування

зносу перебуває в межах від 0,523 до 0,886 мм. Максимальне значення складає

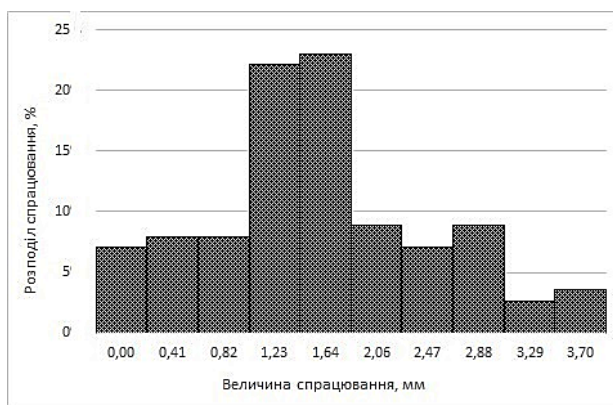
3,5 мм в точці 1. Для вагонів з терміном служби від 35 до 40 років математичне очікування коливається від 0,704 до 0,918 мм, максимальне значення складає 4,5 мм в точці 2. У вагонів з терміном служби понад 40 років математичне очікування більш суттєве: від 0,962 до 1,411 мм. Максимальне значення також виявлене в точці 2.

Максимальне значення спрацювання в купейних вагонах виявлено, як і у вагонах відкритого типу, в точці 2. Його величина дорівнює 7,1 мм, що складає 51 % зносу від номінального розміру.

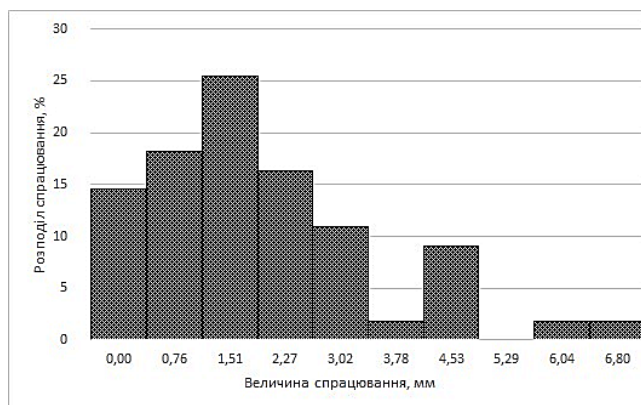
У купейних вагонах математичне очікування зносу більш істотне у порівнянні з вагонами відкритого типу: в деяких точках виміру значення збільшуються в півтора рази. У вагонів з терміном служби до 35 років математичне очікування зносу

коливається від 0,101 до 0,529 мм, максимальне значення перебуває в точці 2 і складає 4,8 мм. Для вагонів від 35 до 40 років математичне очікування зносу зростає приблизно в 2,5 рази в порівнянні з попереднім часовим періодом від 0,245 до 1,46 мм та максимальне значення 5,3 мм сягає в точці 1. Вагони з терміном служби понад 40 років мають більш значний знос в порівнянні з попередніми діапазонами експлуатації: в діапазоні від 0,375 до 1,716 мм та максимальне значення 7,1 мм в точці 2.

Характер розподілення спрацювання є рівномірним по всіх точках вимірювання (рис. 2, а, б). Якщо порівняти між собою величину спрацювання у вагонів, які мають термін служби до 35 років, та вагонів понад 40 років, то в останніх ця величина в середньому збільшується в 2–3 рази.



а



б

Рис. 2. Розподіл спрацювання нижньої обв'язки у точці 2:
а – вагона відкритого типу; б – вагон купейний

Бокова стіна. Вимірювання відбувалось як із правої, так і з лівої сторони вагона згідно з вимогами [13]. Схему вимірювання величини зносу бокової стіни та місця заміру зображено на рис. 3.

У вагонів відкритого типу максимальне значення спрацювання було виявлено зі сторони коридору вздовж вагона (тобто у зоні розташування бічних місць для

пасажирів) і в точці 2 воно складало 2,1 мм. Також значне спрацювання було зафіксоване у підвіконному просторі та в нижній частині бокової стіни (точка 4) – 1,8 мм. Причиною підвищеного корозійного зносу в цих зонах є постійна наявність вологи у підвіконних карманах, де розташовані віконні механізми підняття-опускання.



Рис. 3. Схема проведення вимірювань бокової стіни:
 а –бокова стіна вагона з точками вимірювання; б – схема вимірювання

У вагонах відкритого типу з терміном служби до 35 років математичне очікування зносу коливається від 0,007 до 0,339 мм. Максимальне значення складає 1,2 мм в точці 4. Для вагонів з терміном служби від 35 до 40 років математичне очікування перебуває в межах від 0,026 до 0,381 мм, максимальне значення 1,2 мм також виявлене в точці 4. У вагонів з терміном служби понад 40 років порівняно з вагонами віком 35–40 років математичне очікування більш значне (від 0,04 до 0,405 мм), максимальне значення складає 1,8 мм в точці 4.

Максимальне значення спрацювання в купейних вагонах виявлено в точці 4 як з правої сторони вагона по боковому коридору, так і з лівої сторони, де розташовані купе для пасажирів. Величина спрацювання складає відповідно 1,5 мм з правої сторони та 1,4 мм з лівої.

У купейних же вагонах порівняно з вагонами відкритого типу математичне очікування зносу менш інтенсивне, але в

деяких точках виміру залишається на такому ж рівні. У вагонів з терміном служби до 35 років математичне очікування зносу коливається від 0,022 до 0,134 мм, максимальне значення в точці 2 складає 1,1 мм. Для вагонів з віком від 35 до 40 років математичне очікування зносу збільшується та перебуває в діапазоні від 0,02 до 0,261 мм та максимальне значення 1,5 мм сягає в точці 4. Вагони з терміном служби понад 40 років мають незначний знос в порівнянні з попереднім віковим періодом. Математичне очікування спрацювання перебуває в діапазоні від 0,005 до 0,265 мм та максимальне значення 1,3 мм виявлене в точці 4.

Характер розподілення спрацювання є рівномірним по всіх точках вимірювання (рис. 4, а, б). Якщо порівняти між собою величину спрацювання у вагонів, які мають термін служби до 35 років, та вагонів старіше 40 років, то в останніх ця величина в середньому збільшується у 2 рази.

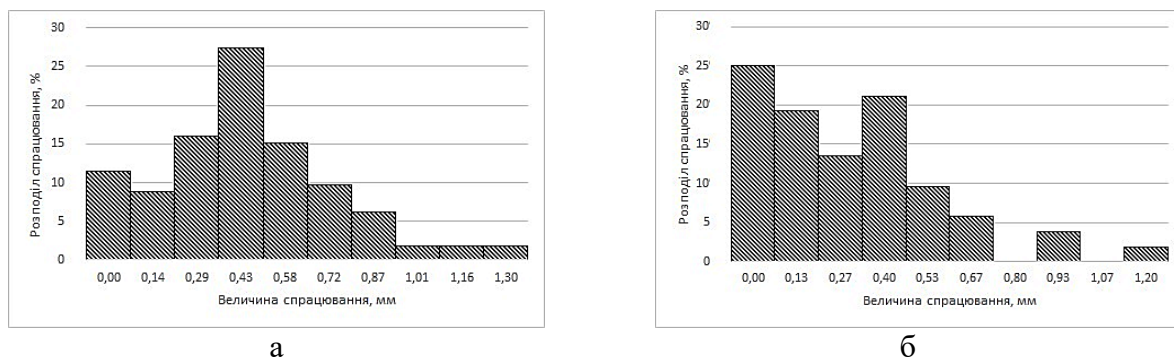


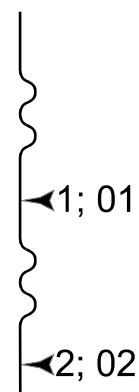
Рис. 4. Розподіл спрацювання бокової стіни у точці 4:
а – вагон відкритого типу; б – вагон купейний

Торцева стіна. Вимірювання відбувалось з робочого та неробочого тамбура вагона згідно з [13]. Схема

вимірювання величини зносу торцевої стіни та відображення вузла подано на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Схема проведення вимірювань торцевої стіни:
а – торцева стіна вагона з точками вимірювання; б – схема вимірювання

У вагонів відкритого типу максимальне значення спрацювання було виявлено з котлової сторони вагона в точці 2 і дорівнювало 0,9 мм при номінальній товщині 2 мм.

У вагонах відкритого типу з терміном служби до 35 років математичне очікування зносу невелике та коливається від 0,002 до 0,007 мм, максимальне значення складає 0,2 мм в точці 02. Для вагонів з терміном служби від 35 до 40 років математичне очікування також невелике, але знос вже більший – від 0,002 до 0,007 мм, максимальне значення складає 0,5 мм також

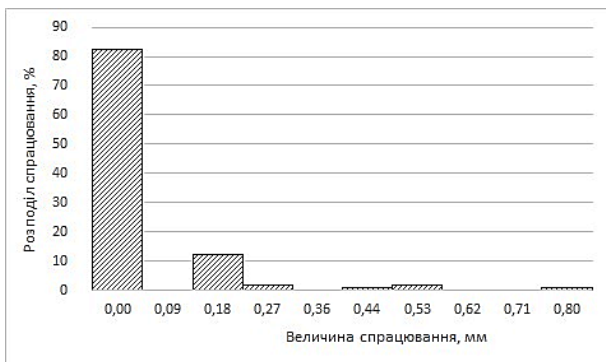
в точці 02. У вагонів з терміном служби понад 40 років математичне очікування збільшується понад 2 рази від 0,012 до 0,035 мм, максимальне значення складає 0,8 мм знову в точці 2.

У купейних вагонах математичне очікування зносу також незначне, але порівняно з вагонами відкритого типу більш інтенсивне. Вагони з терміном служби до 35 років: математичне очікування зносу коливається від 0,014 до 0,033 мм, максимальне значення в точці 1 складає 0,3 мм. Для вагонів від 35 до 40 років математичне очікування зносу збільшується

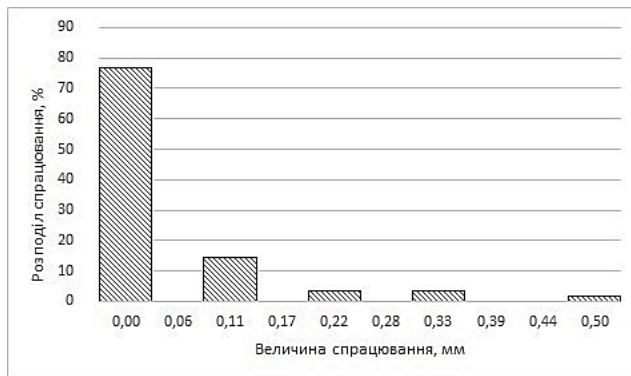
в діапазоні від 0,036 до 0,071 мм, максимального значення 0,8 мм сягає в точці 02. Вагони з терміном служби понад 40 років мають незначний знос в порівнянні з попереднім віковим періодом: від 0,037 до 0,067 мм. Максимальне значення 0,5 мм виявлене в точці 02.

Характер розподілення спрацювання є однаковим практично по всіх точках

вимірювання (рис. 6, а, б). Якщо порівняти між собою величину спрацювання у вагонів, які мають термін служби до 35 років та 35–40 років, то в останніх ця величина в середньому збільшується у 2 рази. При порівнянні вагонів, які мають термін служби 35–40 років та понад 40 років, збільшення не відбувається.



а



б

Рис. 6. Розподіл спрацювання торцевої стіни у точці 02:
а – вагон відкритого типу; б – вагон купейний

Обшивка даху. Схему вимірювання величини зносу обшивки даху та відображення вузла подано на рис. 7.

У пасажирських вагонах вимірювання величини зносу обшивки даху проводилися

по всіх зазначених точках. Максимальне значення спрацювання обшивки даху у вагонах некупейного типу з лівої та правої сторони вагона виявлене у точках 2 та 02–0,7 мм при номінальній товщині 2 мм.



а



б

Рис. 7. Схема проведення вимірювань обшивки даху:
а – обшивка даху вагона з точками вимірювання; б – схема вимірювання

Отримані максимальні значення у величині спрацювання по різних сторонах скату обшивки даху, у точках 2 та 02 для

вагона відкритого типу, та точки 2 та 02 для купейного вагона.

Аналіз характеру розподілу спрацювання відкритого типу вагона наочно подано на рис. 8. Очевидно, що переважна більшість пошкоджень обшивки даху згрупована у діапазоні від 0 до 0,31 мм.

Порівняно з вагонами відкритого типу в купейних вагонах в точках (2, 02) спостерігається розбіжність в діапазоні

пошкоджень обшивки даху від 0 до 0,33 мм. Невелика розбіжність між типами вагонів зумовлена тим, що на скат обшивки даху діють однакові фактори (погодні умови, збір вологи та ін.).

Розподіл спрацювання обшивки даху для купейного вагону представлено на рис. 9.

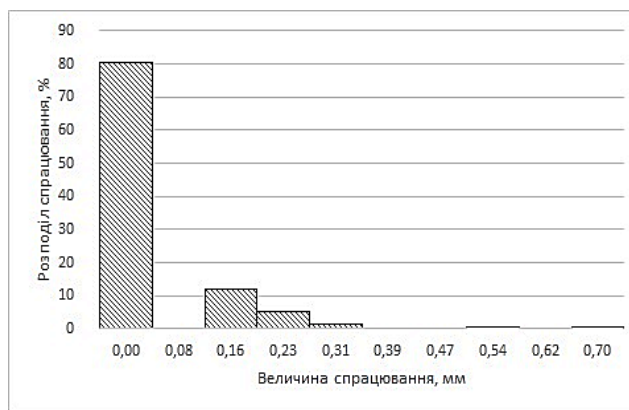
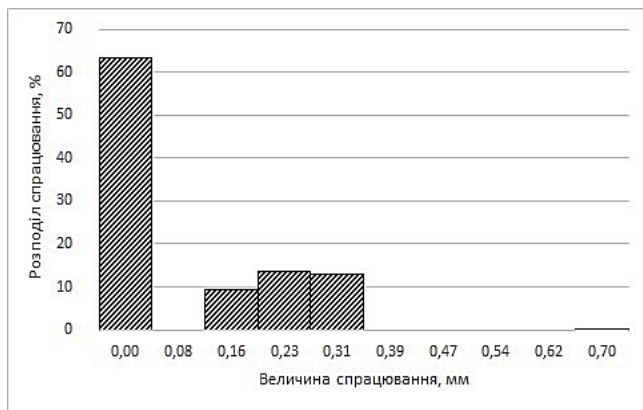


Рис. 8. Розподіл спрацювання обшивки даху відкритого типу: а – точка 2; б – точка 02

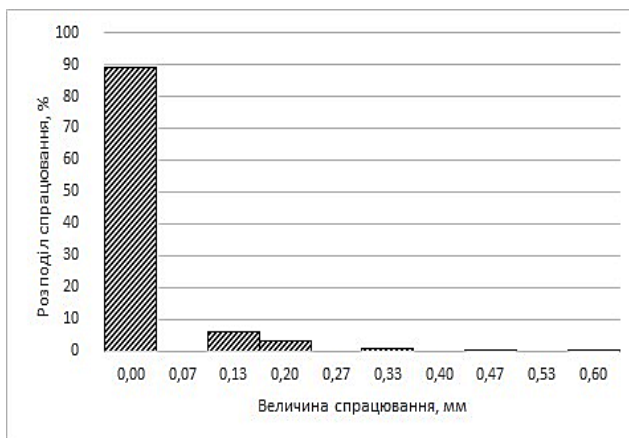
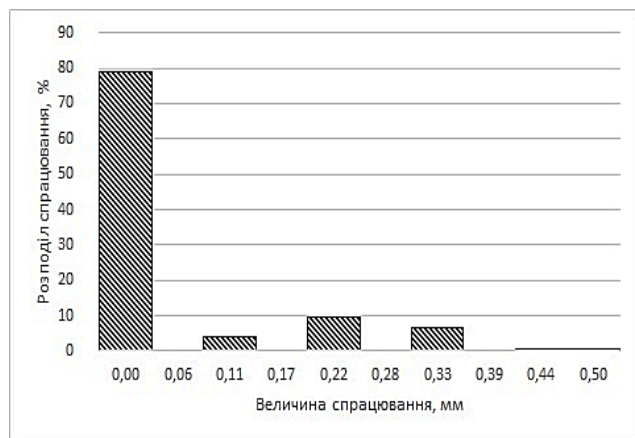


Рис. 9. Розподіл спрацювання обшивки даху купейного типу: а – точка 2; б – точка 02

Становить інтерес розподілення спрацювання у вагонів різних років побудови. Найбільша інтенсивність нарощування спрацювання характерна для

вагонів, термін служби яких перевищив 40 років.

Якщо порівняти між собою величину спрацювання у вагонів, які мають термін

служби до 35 років та 35–40 років, то в останніх ця величина в середньому збільшується в 1,2 рази. Аналогічне порівняння для вагонів, які мають термін служби 35–40 років та понад 40 років, свідчить про збільшення у 1,5 рази.

Висновок. Виконано порівняльний статистичний аналіз величини та характеру спрацювання кузовів пасажирських вагонів різних моделей з різним терміном служби.

Аналіз результатів свідчить, що вагони перебувають у незадовільному технічному стані. Однією з причин є спрацювання поверхонь кузовів вагонів. Особливо небезпечні спрацювання бокових стін у нижній частині.

Існує значна відмінність між різними типами вагонів у величині та характері спрацювання несучих елементів кузовів вагонів. Також на інтенсивність спрацювання впливає термін експлуатації.

Інтенсивне нарощування величини спрацювання несучих поверхонь кузовів може привести до створення загрози безпеці руху. Тому відстеження залежностей спрацювання кузовів дасть змогу у подальшому зі збільшеною точністю спрогнозувати зменшення залишкового ресурсу пасажирських вагонів та більш ефективно планувати заходи для відновлення їх працездатності.

Список використаних джерел

1. Трубочов Ю. О., Головка В. Ф., Борзилов І. Д. Визначення залишкового ресурсу несучих конструкцій пасажирських вагонів, що відпрацювали свій ресурс. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2001. Вип. 46. С. 34–36.
2. Пигунов А. В. Прогнозирование остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов и управление восстановлением их ресурса. *Вест. Белорус. гос. ун-та тр-та*. Гомель. 2002. № 1. С. 12–17.
3. Сенько В. И., Пигунов А. В. Исследование влияния срока эксплуатации пассажирских вагонов на величину коррозионных повреждений металло-конструкции кузовов. *Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: Междун. науч.-практ. конф.* Гомель. 2003. С. 54–55.
4. Пуларія А. Л., Лобойко Л. М., Грічаний М. А. Визначення міцнісних якостей кузова пасажирського вагона після КВР. *Зб. наук. праць*. Донецьк: ДонІЗТ, 2008. Вип. 13. С. 107–111.
5. Божок Н. О., Булгакова Ю. В., Пуларія А. Л. Дослідження сучасного стану парку пасажирських вагонів. *Проблеми економіки транспорту: зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2014. Вип. 8. С. 78–87.
6. Дослідження залежностей спрацювання несучих елементів пасажирських вагонів: *зб. наук. праць ДУІТ*. Сер. Транспортні системи і технології / І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, В. М. Петухов, М. О. Сергієнко. Київ: ДУІТ. Вип. 36. С. 72–81.
7. Аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів: *Вісн. Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. Нові рішення в сучасних технологіях. Транспортне машинобудування / І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, Ю. С. Павленко, М. О. Сергієнко. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 45 (1321). С. 41–46.
8. Остапюк Б. Я. Подовження терміну експлуатації пасажирських вагонів: *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2004. Вип. 4. С. 165–173.
9. Kobishanov V., Lozbinev V., Sakalo V., Antipin D., Shorohov S., Vysocky A. Passenger Car Safety Prediction. *World Applied Sciences Journal*. 2013. № 24. P. 208-212. URL: [https://www.idosi.org/wasj/wasj24\(1\)2013.htm](https://www.idosi.org/wasj/wasj24(1)2013.htm)(last access: 25.05 2021).

10. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., Bozdog S. Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. Intern. Iron & Steel 02.04 – 04.04.2012 Karabük University. Istanbul. 2012. P. 579–586. URL: <https://www.researchgate.net/publication/328676559> (last access: 25.05.2021).

11. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., Bozdog E., Railway passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. Intern. J. of Crashworthiness. London, 2011. № 16. Iss. 3. P. 319-329. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13588265.2011.566475> (last access: 25.05.2021).

12. ДСТУ 7774:2015. Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальнотехнічні норми для розрахунку та проектування механічної частини вагонів, УкрНДІВ, від 22.06.2015 № 61. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73199 (дата звернення: 25.05.2021).

13. Методика технічного діагностування пасажирських вагонів, що виступили призначений термін, з метою його продовження. ЦЛ-0070. УкрНДІВ / А. В. Донченко, М. В. Троцький, Ю. О. Холод та ін. Київ, 2008. С. 63. URL: http://irbis-nbuv.gov.ua/irbis_nbuv/cgiirbis_64 (дата звернення: 25.05.2021).

14. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособ. для вузов. Изд. 4-е. Москва: Высшая школа, 1972. 368 с.

Мартинів Ігор Ернстович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0481-3514. Тел.: 057-7301035. E-mail: martinov@kart.edu.ua.

Труфанова Альона Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1702-1054. Тел.: 057-7301035. E-mail: trufanova@kart.edu.ua.

Сергієнко Максим Олегович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9619-2283. Контактний тел.: 057-7301035. E-mail: eatdustukr@gmail.com.

Martynov Igor, D. Sc. (Tech.), professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0481-3514. E-mail: martinov@kart.edu.ua.

Alyona Trufanova, PhD (Tech.), Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1702-1054. E-mail: trufanova@kart.edu.ua.

Sergienko Maksim, Postgraduate student, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9619-2283. E-mail: eatdustukr@gmail.com.

Статтю прийнято 14.04.2021 р.

УДК 629.4.083

УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ СЕРВІСУ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКУ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, асп. Д. О. Мацегора, магістри О. В. Польовий, М. В. Пахомов

INVENTORY MANAGEMENT IN THE ORGANIZATION OF LOCOMOTIVE PARK SERVICE

D. Sc. (Tech.) O. S. Krashenin, postgraduate student D. O. Matsegora, masters O. V. Pol'ovyy, M. V. Pakhomov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242254>

Анотація. *Запровадження нової системи підтримки і відновлення локомотивного парку на принципах сервісу потребує чіткої організації постачання запасними частинами ремонтної інфраструктури.*

У статті розглядаються питання вирішення оптимізаційної задачі балансу вигоди і втрат при створенні запасів для сервісу локомотивів.

Вважаючи, що процес попиту запасних частин мав переважно випадковий характер, запропоновано введення цільової функції, що враховує визначення закону розподілу потреби в запасних частинах на основі мінімуму приведених витрат на їх придбання і збереження. З урахуванням цього запропоновано створення ідеології «віртуального сховища» для оптимізації запасів та їх витрат.

Ключові слова: *запаси, функція розподілу, закон потреби і витрат, сховище.*

Abstract. *Planned warning system for locomotive repair has almost exhausted its potential. This was facilitated by the rapid deterioration of the technical condition of the locomotive fleet and infrastructure for both repair and operation. Rolling stock renewal is almost non-existent, and there is interest in providing railway services due to rising tariffs and low levels of comfort.*

On the contrary, some foreign railways consider the planned warning system exhausted, especially in compliance with all requirements for maintenance and repairs, timely modernization measures.

But at the same time, the policy of monitoring the technical condition of manufacturers to form the infrastructure for the organization of repair and modernization of the series of locomotives is gradually developing. The first scientific researches in this direction were devoted to substantiation of strategy of interaction of traditional approaches and those which bring considerable differences from traditional. This is the adoption of a strategy for the distribution of operational and repair functions of locomotive enterprises, and when, together with manufacturers, repair plants and depots, the need to transfer repairs to service centers is determined.

At the same time, large centers are being formed that provide service services for the regions of operation, namely, organize the monitoring and audit of the enterprise and ensure the organization of rolling stock repairs.

Without a clear organization of the supply system, the organization of locomotive service, which requires the selection of the optimal procurement procedure and stocks.

The introduction of a new system of maintenance and restoration of the locomotive fleet on the principles of service requires a clear organization of the supply of spare parts for repair infrastructure.

The system considers the solution of the optimization problem of the balance of profits and losses in the creation of stocks for locomotive service.

Assuming that the process demand was mostly random, it is proposed to introduce a target function that takes into account the definition of the law of distribution of demand for spare parts, based on the minimum of the given measurements for their acquisition and storage. With this in mind, it is proposed to create an ideology of «virtual storage» to optimize stocks and their costs.

Keywords: *stocks, distribution function, law of needs and expenses, warehouse.*

Вступ. Планово-попереджувальна система ремонту локомотивів майже вичерпала свій потенціал. Цьому сприяло стрімке погіршення технічного стану локомотивного парку і інфраструктури як ремонту, так і експлуатації. Оновлення рухомого складу відбувається повільно, падає інтерес до надання послуг залізницею через зростаючі тарифи і низький рівень комфорту. Нові локомотиви, придбані за кордоном, оснащені більш складним обладнанням і системами автоматичного управління та регулювання, у зв'язку з чим актуальним постає питання необхідності обслуговування локомотивів спеціалізованими організаціями [1].

Однією з форм такого обслуговування є обов'язковий післяпродажний сервіс тягового рухомого складу (TPC) компаніями-виробниками.

За кордоном взаємодія компаній – операторів залізниць і компаній-виробників у частині забезпечення експлуатаційної надійності локомотивів все більшою мірою ведеться спільно, на постійній основі і на тривалий період. Додатковим фактором розвитку системи сервісу є масштабність і хороша передбачуваність ринку ТО локомотивів, що дає змогу укласти контракти на термін до 30 і більше років. Необхідно відзначити, що за кордоном під сервісом локомотивів розуміють не просто один з видів діяльності з метою отримання прибутку. Питання ставиться набагато ширше: мова йде про глобальний сервіс з технічної підтримки експлуатації [2]. В даному випадку ризику по заміні вузлів і деталей приймає на себе виробник [3].

Одночасно формуються крупні центри, що надають послуги сервісу для

регіонів експлуатації, а саме організують моніторинг і аудит підприємства і забезпечують організацію ремонту рухомого складу.

Таким чином, без чіткої організації системи постачання організація сервісу локомотива, що потребує обрання оптимальної процедури заготівлі і запасів, неможлива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За кордоном проблеми розвитку сервісу з теоретичної площини перейшли в практичну.

Перші наукові дослідження в цьому напрямку були присвячені обґрунтуванню стратегії взаємодії традиційних підходів і тих, що мають значні відмінності від традиційних. Це прийняття стратегії на розподіл експлуатаційних та ремонтних функцій локомотивних підприємств, коли разом з виробниками, ремонтними заводами і депо визначається необхідність передачі ремонту в сервісні центри [4, 5].

Теоретичні фактори зі створення нової системи ТО, ПР знайшли своє відображення в роботах [6, 7].

У нашій країні на державному рівні намічені кроки з реформування галузі [3].

Разом з цим багато завдань як теоретичного, так і прикладного характеру залишається [9, 10, 11].

Постають завдання вибору потужності сервісних центрів, їх територіального розташування, організації взаємодії з постачальниками локомотивної продукції і традиційними методами і центрами з організації ремонту [8, 9].

Усе це робить актуальним завдання постачання запасів для організації ремонту.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи полягає у розробленні методики управління запасами при організації сервісу локомотивів.

Для цього потрібно вирішити такі питання:

- визначити критерій витрат на утримання запасів при заданому законі розподілу необхідної кількості запасів;
- розрахувати величину запасів;
- сформулювати умови оптимальної кількості запасів;
- створення алгоритму функціонування бази даних «віртуального сховища».

Основна частина дослідження. Управління запасами є важливим елементом діяльності підприємства, оскільки на їх створення витрачається значна кількість матеріальних ресурсів. Запаси являють собою один із факторів, що впливає на рівень ефективності функціонування підприємства. Проте більшість підприємств не приділяють належної уваги питанням управління виробничими запасами і постійно недооцінюють свої майбутні потреби в наявних запасах, внаслідок чого змушені нести додаткові витрати [12].

У кожному завданні управління запасами розглядаються:

- величина попиту на певний матеріал;
- наявність запасу цих матеріалів, його поповнення та відновлення, здійснюване безперервно або в окремі проміжки часу;
- витрати, пов'язані зі зберіганням запасів, збитки через незадовільний попит і інші витрати, що утворюють оптимізовану цільову функцію;
- обмеження, обумовлені тими чи іншими факторами, пов'язаними із завданням управління запасами.

Завдання управління запасами належить до завдань оптимізаційного типу. Кожна зі складових процесу поставки, зберігання і витрачання запасів може бути оцінена деякими витратами. Так, кожна

партія запасів вимагає витрат на поставку, якими можуть бути транспортні витрати, витрати на заробітну плату, витрати на запуск в серію і т. д. Очевидно, що зі збільшенням періоду між суміжними поповненнями запасів кількість партій в плановому періоді буде зменшуватися і витрати на поставки будуть знижуватися.

Запаси, що надійшли на підприємство, мають зберігатися на складі, і для цього також потрібні деякі витрати. Зі збільшенням розмірів партії запасів витрати на зберігання будуть зростати. Таким чином, сумарні витрати в моделях управління запасами складаються з альтернативних доданків, що являють собою витрати на поставку і зберігання. При збільшенні періоду між поставанням і відповідно обсягу поставок одна зі складових (витрати на зберігання) збільшується, а інша (витрати на поставку) – зменшується. Завдання оптимізації запасів зводиться до визначення шуканих параметрів моделі, що забезпечують мінімум сумарних витрат.

Загальні витрати, пов'язані з поповненням, зберіганням і витратами запасів, можна подати виразом

$$B = B_n + B_z + B_o \rightarrow \min \quad (1)$$

де B_n, B_z – витрати відповідно на поповнення і зберігання запасів;

B_o – економічні збитки, обумовлені дефіцитом запасів.

Функція (1) є функцією витрат моделі управління запасами. Вона набуває різного вигляду в залежності від особливостей кожної конкретної моделі.

Моделі управління запасами при випадковому попиті використовуються для визначення необхідної кількості запасних частин, виготовлених самостійно або придбаних разом з основним обладнанням [13]. У процесі експлуатації може виявитися, що необхідності в деяких

частинах немає і підприємство зазнає збитків від їх придбання та зберігання. Можливий і такий варіант, коли запасних частин на період експлуатації установки виявилось недостатньо. У цьому випадку підприємство звертається до заводу-виробника, що поставляє необхідний виріб. Однак на його виготовлення і доставку потрібен певний час, протягом якого установка простоє і підприємство зазнає значних збитків.

Для складання функції витрат в моделях такого типу необхідно зіставити витрати з придбання запасних частин і збитків, пов'язаних з простоєм обладнання через їх відсутність.

Відомий закон розподілу необхідної кількості запасних частин

$$P_n, \sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 \quad (2)$$

Наприклад, підприємство придбало k запасних деталей, а на час експлуатації установки їх треба було n . Вартість однієї деталі з урахуванням витрат на її поставку і зберігання позначимо – c_1 , а збиток підприємства, обумовлений відсутністю запасних частин – c_2 . Якщо $n \leq k$, то витрати підприємства дорівнюватимуть $c_1(k-n)$. Якщо ж $n > k$, то збиток складе $c_2(n-k)$.

Оскільки кожному значенню n відповідає своя ймовірність P_n , то визначимо математичне очікування збитку підприємства, яке і являє собою функцію витрат

$$B(k) = c_1 \sum_{n=0}^k P_n(k-n) + c_2 \sum_{n=k+1}^{\infty} P_n(n-k) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Таким чином, при заданому законі розподілу необхідної кількості запасних частин і відомих параметрах c_1 і c_2 необхідно знайти величину k , при якій

математичне очікування сумарних витрат буде мінімальним.

Знайдемо таке значення $k = k_0$, при якому функція (3) мінімальна. Для цього слід визначити $B(k+1)$ та $B(k-1)$

$$\begin{aligned} B(k+1) &= c_1 \sum_{n=0}^{k+1} (k+1-n)P_n + c_2 \sum_{n=k+2}^{\infty} (n-k-1)P_n = \\ &= c_1 \sum_{n=0}^k (k+1-n)P_n + (k+1-k-1)P_{k+1} + \\ &+ c_2 \sum_{n=k+1}^{\infty} (n-k+1)P_n - c_2(k+1-k-1)P_{k+1} = \\ &= c_1 \sum_{n=0}^k (k-n)P_n + c_1 \sum_{n=0}^k P_n + c_2 \sum_{n=k+1}^{\infty} (n-k)P_n - \\ &- c_2 \sum_{n=k+1}^{\infty} P_n. \end{aligned}$$

З огляду на те, що $\sum_{n=k+1}^{\infty} P_n = 1 - \sum_{n=0}^k P_n$, отримаємо

$$B(k+1) = c_1 \sum_{n=0}^k (k-n)P_n + c_2 \sum_{n=k+1}^{\infty} (n-k)P_n + (c_1 + c_2) \sum_{n=0}^k P_n - c_2 = B(k) + (c_1 + c_2) \sum_{n=0}^k P_n - c_2.$$

Аналогічно можна довести, що

$$B(k-1) = B(k) - (c_1 + c_2) \sum_{n=0}^{k-1} P_n + c_2. \quad (4)$$

Нехай при $k=k_0$ функція $B(k_0)$ мінімальна, тоді

$$B(k_0+1) > B(k_0), \\ B(k_0-1) > B(k_0).$$

Виконання цих нерівностей еквівалентно виконанню умов

$$(c_1 + c_2) \sum_{n=0}^{k_0} P_n - c_2 > 0, \\ -(c_1 + c_2) \sum_{n=0}^{k_0-1} P_n + c_2 > 0.$$

З цієї системи нерівностей випливає, що

$$\sum_{n=0}^{k_0} P_n > \frac{c_2}{c_1 + c_2}, \\ \sum_{n=0}^{k_0-1} P_n < \frac{c_2}{c_1 + c_2}.$$

Звідси отримаємо умову, визначальне значення k_0 ,

$$\sum_{n=0}^{k_0-1} P_n < \frac{c_2}{c_1 + c_2} < \sum_{n=0}^{k_0} P_n.$$

Таким чином, розв'язання завдання зводиться до такого:

будується кумулята функції розподілу потрібної кількості запасних частин

$$F(k) = \sum_{n=0}^k P_n;$$

обчислення відношення $\frac{c_2}{c_1 + c_2}$;

визначається інтервал значення k , всередині якого функція розподілу дорівнює

$$\frac{c_2}{c_1 + c_2};$$

верхня межа цього інтервалу приймається рівною згаданому значенню k_0 .

Приймаємо, що потреба в запасах підпорядкована закону Пуассона

$$f(k) = \frac{a^k}{k!} e^{-a}, \quad (5)$$

де a – математичне очікування використовуваної величини запасів.

Значення k може набувати значення від 0 до k . В таблиці запишемо розподіл закону Пуассона для $a_1 = 0,5; a_2 = 1; a_3 = 2$.

На підставі цих даних, що наведені в таблиці, обчислюємо $F(k) = \sum f(k)$ та побудуємо графік (рис. 1).

Таблиця

Розрахунок математичного очікування використовуваної величини запасів

k	0	1	2	3	4
$f(k)$	e^{-a}	ae^{-a}	$\frac{a^2}{2}e^{-a}$	$\frac{a^3}{6}e^{-a}$	$\frac{a^3}{24}e^{-a}$
$a_1 = 0,5$	0,607	0,3037	0,076	0,0127	0,00116
$a_2 = 1$	0,37	0,37	0,185	0,06	0,015
$a_3 = 2$	0,136	0,272	0,272	0,182	0,0907

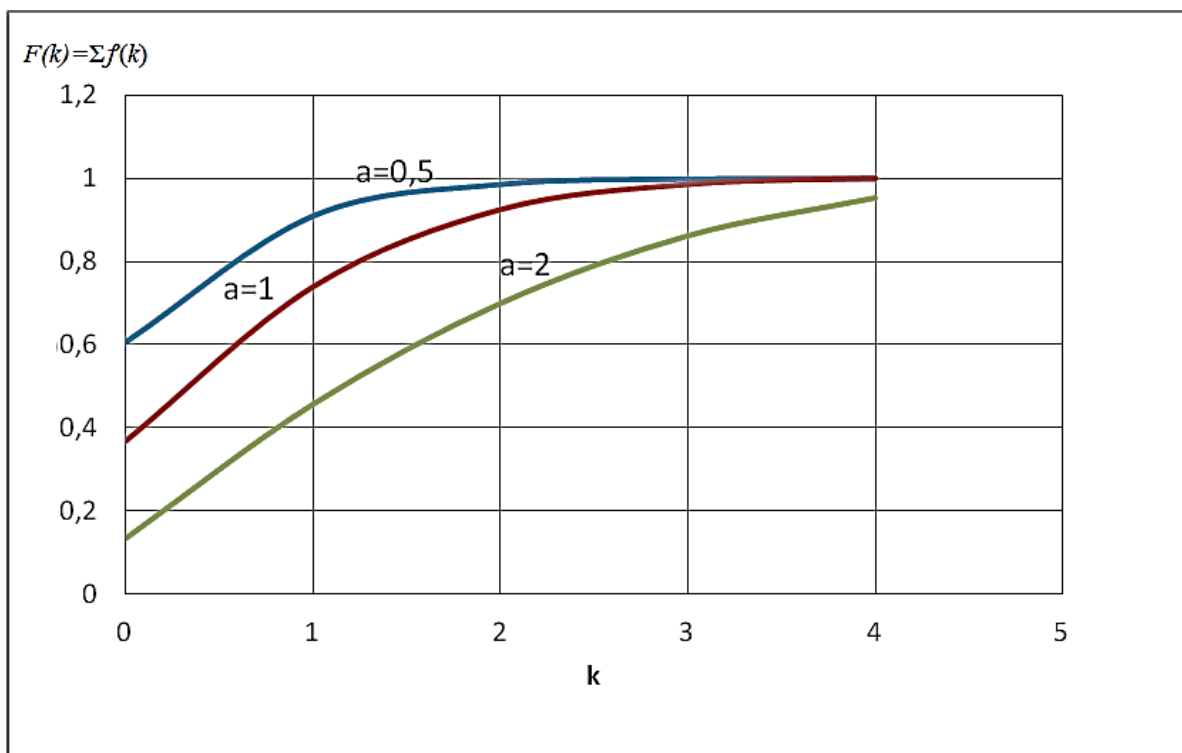


Рис. 1. Графік функції розподілу потрібної кількості запасних частин

Якщо $\frac{c_2}{c_1 + c_2}$ дорівнює, наприклад, $\bar{c} = 0,8$ то, відповідно до рис. 1, при $a_1 = 0,5$ потрібна одна одиниця запасу, при $a_2 = 1$ – дві, при $a_3 = 2$ – три.

При зростанні \bar{c} зростає потреба в запасах, що зрозуміло з міркувань зростання витрат, які обумовлені відсутністю запасів.

Разом з цим аналіз сучасного стану придбання і обороту запасних частин зі

складу в ремонтні цехи і відділення в сервісних локомотивних депо (СЛД) показав, що ускладнений контроль проходження деталей і вузлів, які надходять у ремонт зі складу та перебувають у ремонті в цехах і відділеннях СЛД. Не простежується взаємозв'язок деталей і вузлів депо, що може призводити до наднормативних запасів деталей та вузлів.

Для оптимізації нормативного запасу деталей і вузлів і в першу чергу для скорочення часу ремонтного циклу

необхідно створити підсистему «Віртуальний склад» у структурі ІС Склад на додаток до реального складу запасних частин. У цей «Віртуальний склад» поміщують деталі і вузли, що надходять у

ремонт зі складу депо, і деталі і вузли тепловозів, які надійшли в ремонт.

Можна запропонувати наступну схему обороту деталей та вузлів, внесених у «Віртуальний склад» (рис. 2).

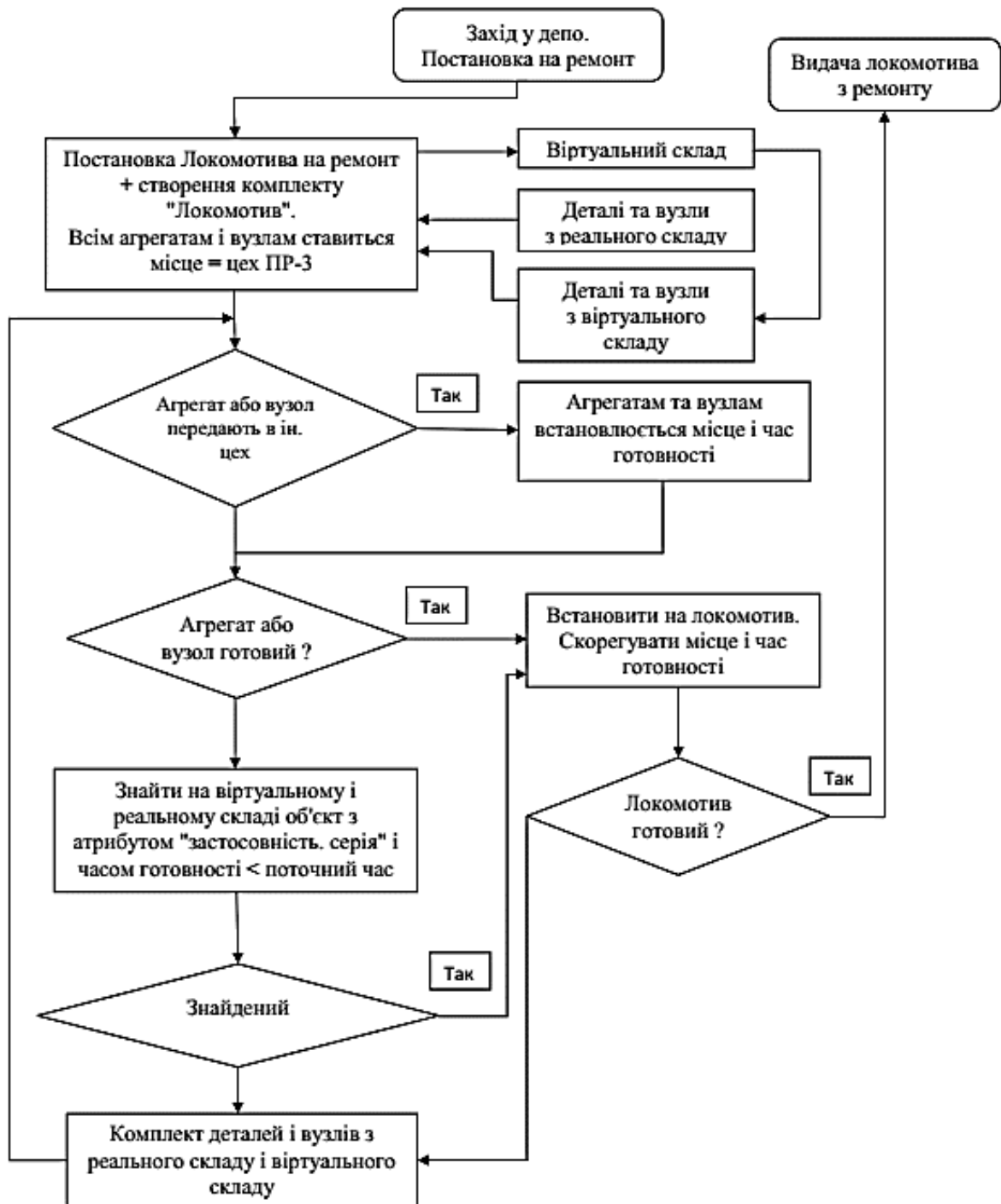


Рис. 2. Схема обороту деталей та вузлів у «Віртуальному складі»

Підсистема «Віртуальний склад» поліпшує контроль і оперативність виконання ремонтів. Так, при постановці локомотива на ремонт всі вузли і деталі локомотива автоматично надходять до реєстру «Віртуального складу». Процес ремонту і готовність деталей відстежується в режимі реального часу. Таким чином, контролюється, в якому підрозділі і на якому ремонті перебувають вузли та деталі, а також в якому вони стані. Це дасть змогу контролювати процес проходження через ремонтні дії деталей і вузлів, а також контролювати технологічний запас.

Знаючи час виконання великих видів ремонту тепловозів, що перебувають у ремонті, стан їх вузлів і агрегатів, з'являється можливість оперативного планування виконання ремонтів, своєчасного замовлення запасних частин.

Якщо тепловоз надійшов на плановий ПР-3, при розбиранні всі деталі, вузли і агрегати надходять у «Віртуальний склад». Слідом надходить тепловоз тієї ж серії на позаплановий ремонт з несправним ТЕД. З'являється можливість справний ТЕД з ПР-3 передати на позаплановий ремонт, а несправний ТЕД за час виконання ремонту в обсязі ПР-3 або відремонтувати або запросити новий ТЕД з реального складу депо або з новоствореного центрального складу.

У зв'язку з цим виникає необхідність створення центрального складу на базі одного з сервісних локомотивних депо для групи сервісних локомотивних депо в 12–24-годинній доступності. Це все дасть змогу скоротити номенклатуру матеріального складу сервісного локомотивного депо, а дорогі вузли і агрегати зосередити на центральному матеріальному складі. Схему обороту запасних частин подано на рис. 3



Рис. 3. Структурна схема обороту запасних частин

Моніторинг обороту потреби основних вузлів і агрегатів технологічного і страхового запасів дасть змогу уточнити програму ремонту вузлів і агрегатів заводами-виробниками. Одночасно це дасть

змогу оптимізувати закупівлю деталей, вузлів і агрегатів сервісними локомотивними депо, скоротити час перебування локомотивів у всіх видах ремонту.

Висновки. В результаті проведеної роботи встановлено, що визначення критерію витрат дає змогу оптимізувати втрати підприємства на утримання запасів для сервісу локомотивів. Розрахунок величини запасів показав: якщо $c = 0,8$ то, відповідно до рис. 1, при $a_1 = 0,5$ потрібна одна одиниця запасу, при $a_2 = 1$ – дві, при $a_3 = 2$ – три. Для забезпечення умови опти-

мальної кількості запасів слід враховувати значення співвідношення $\bar{c} = f(c_1, c_2)$. Створення алгоритму функціонування бази даних «Віртуальне сховище» поліпшує контроль і оперативність виконання ремонтів. У подальшому взаємодія бази даних віртуального та матеріального сховища дасть змогу ефективно контролювати технологічні процедури руху запасів безпосередньо на підприємстві.

Список використаних джерел

1. Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки. Розпорядження КМУ від 12 червня 2019 р. № 591-р. Документи АТ «Укрзалізниця». URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F-4-Turography.pdf> (дата звернення: 10.01.2021).
2. Техническое обслуживание подвижного состава в странах Европы. *Железные дороги мира*. 2009. № 4. С. 50–52.
3. Германия: избыток мощностей на рынке технического обслуживания и ремонта. *Железные дороги мира*. 2009. № 4. С. 57–60.
4. Крашенінін О. С., Одегов М. М., Семененко Ю. О. Ефективність експлуатації тягового рухомого складу і об'єктів залізничної інфраструктури. Science, society, education: topical issues and development prospects. *Abstracts of International Scientific and Practical Conference Kharkov, Ukraine 20-21 January 2020*. P. 217–220.
5. Puzyr V., Krasheninina O., Zhalkin D., Datsun Y., Oboznyi O. Estimation of the influence of the interaction of factors pairs on the coefficient of route execution possibility. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. № 659. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/659/1/012057> (last access: 10.02.2021).
6. Крашенінін О. С., Сулежко Д. Е., Кузьмін Є. Ю. Визначення оптимальних запасів ресурсів у локомотивному депо. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 186. С. 87–92.
7. Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Задесенець В. І. Обґрунтування критерію ефективності експлуатації локомотивів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 4. С. 10–14.
8. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин: підручник. Київ: Либідь, 2003. 424 с.
9. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин, А. П. Фалендыш. Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2011. 174 с.
10. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. Москва: Сов. радио, 1975. 472 с.
11. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. Практикум. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. 560 с.
12. Грещак М. Г., Гребешкова О. М., Коцюба О. С. Внутрішній економічний механізм підприємства. Київ: КНЕУ, 2001. 228 с.

13. Санько Я. В., Григорова Д. В. Щодо формування витратної частини логістичної системи при визначенні цінової політики підприємства. *Комунальне господарство міст*. 2011. № 101 (1). С. 311–316.

Крашенінін Олександр Семенович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372.

Тел.: +38 (097) 991-70-99. E-mail: Alsem1512@gmail.com.

Мацегора Дмитро Олександрович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 144-56-12. E-mail: macegoradmitry@gmail.com.

Польовий Олександр Володимирович, магістрант, групи 211-ЛЛГ-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту.

Пахомов Максим Володимирович, магістрант, групи 211-ЛЛГ-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту.

Krashenin Alexander Semenovich, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372. Tel.: +38 (097) 991-70-99.

Email: Alsem1512@gmail.com.

Matsegora Dmytro Oleksandrovych, postgraduate student, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 144-56-12. Email: macegoradmitry@gmail.com.

Pol'ovyy Alexander, master group 211-LLG-D19 of the Ukrainian State University of Railway Transport.

Pakhomov M.V., master, group 211-LLG-D19 of the Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 20.05.2021 р.

УДК 620.92

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В СОНЯЧНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ТЯГОВІЙ ПІДСТАНЦІЇ

Канд. техн. наук В. В. Панченко, аспірант Р. О. Харін

RESEARCH OF ENERGY LOSS IN A SOLAR POWER PLANT AT A TRACTION SUBSTATION

PhD (Tech.) V. Panchenko, postgraduate student R. Kharin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242262>

Анотація. Проведено аналіз втрат в сонячній електростанції постійного струму № 18 м. Зміїв Харківського регіону зі всіма кліматичними умовами даного регіону. Проаналізовано показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях. Згідно з експериментальними даними на основі програмного комплексу PVsyst виміряно втрати енергії та проведений розрахунок зменшення викидів CO₂ в сонячній електростанції.

Ключові слова: сонячна електростанція, інвертори, втрати енергії, тягова підстанція, фотоелектрична система.

Abstract. An analysis of losses in a solar power plant of direct current № 18 c. Zmiiv, Kharkiv region with all climatic conditions of this region. The energy efficiency indicators of inverters used

in these solar power plants are analyzed. According to experimental data based on the software package PVsyst measured energy losses generated by a solar power plant. Connecting the SES to the mains can improve the voltage levels at the system nodes, but it is necessary to provide a power reserve in the system to cover the power deficit in the event of a sudden shutdown due to natural factors.

To analyze the energy losses of solar energy, the software package PVsyst was used, which allows you to analyze the parameters of electricity losses with the display of loss diagrams for the year and the dependence of the amount of losses in electricity generation by solar panels. PVsyst software is used to calculate the output power, performance, and total loss of a station connected to the network. Losses calculated by PVsyst software include two types: PV array loss and System loss.

After analyzing research conducted in Ukraine and other European countries, it is possible to conclude that the impact of poor quality electricity on electrical equipment is quite significant, and the study of the impact of unconventional generation sources on electricity quality indicators will identify ways to reduce electricity losses and increase electricity life equipment. The efficiency of solar energy conversion is greatly reduced due to reflections from the surface of the photovoltaic system. Also due to the peculiarities of the construction of photovoltaic converters there is a decrease in the efficiency of solar panels with increasing temperature.

Keywords: solar power plant, inverters, energy losses, traction substation, photovoltaic system.

Вступ. Електрифікований залізничний транспорт є базовою складовою транспортного сектора України. Забезпечуючи функціонування і сталий розвиток економіки держави, він є однією з найбільш енергоємних галузей, що має високий потенціал з енергозбереження. Приєднання СЕС до мережі може покращити рівні напруг у вузлах системи.

Проаналізувавши дослідження, які проводилися в Україні [1] та в інших європейських країнах, можна зробити висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим, а дослідження проблеми впливу джерел нетрадиційної генерації на показники якості електроенергії дозволить визначити шляхи зменшення втрат електроенергії та збільшити термін роботи електричного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання про дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції є досить актуальним для нашої країни. На території України зміна умов надання послуг з електропостачання стала причиною стрімкого збільшення та розвитку відновлювальних джерел електроенергії. Огляд існуючих досліджень

втрат енергії в сонячній електростанції показує, що обсяг виконаних досліджень невеликий. У зв'язку з чим аналіз і можливість зменшення втрат енергії в сонячній електростанції є актуальним завданням.

У дослідженні таких науковців, як Т. Н. Нгуен, В. Д. Сізов, М. Ф. Ву, Т. Х. Ку [2], подано результати моделювання з використанням програми PVsyst сонячної електростанції потужністю 26 кВт на даху комерційної будівлі в місті Ханой, результати даного дослідження відобразили потенціал сонячної енергії, кількість виробленої енергії та ефективність сонячної електростанції, під'єднаної до мережі.

Н. Vidal, М. Rivera, Р. Wheeler and N. Vicencio у своєму дослідженні [4] аналізують поведінку під'єднаної до мережі фотоелектричної системи 8.2 кВт для живлення електричного навантаження на місці або для живлення електричної мережі. Розглядалися кількість виробленої енергії та продуктивність фотоелектричної системи.

У дослідженнях не було вирішено питання дослідження та аналізу втрат енергії в сонячній електростанції.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даної статті є

проведення аналізу та дослідження закономірностей втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції постійного струму № 18 м. Зміїв Регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» протягом календарного року.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: провести аналіз втрат енергії в сонячних панелях та системі сонячної електростанції; проаналізувати показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях; провести моделювання енергетичних втрат сонячних батарей та продуктивності фотоелектричної системи.

Для аналізу та моделювання енергетичних втрат сонячної енергії застосуємо програмний комплекс PVsyst, який дозволяє проаналізувати параметри втрат електроенергії з відображенням діаграм втрат за рік та залежність величини втрат при виробленні електроенергії сонячними панелями.

Основна частина дослідження.

Аналіз джерел [2, 3, 5, 7] свідчить про те, що загальні втрати енергії при перетворенні сонячного випромінювання у фотоелектричній системі включають до себе:

- втрати в проводах – 1 %;
- втрати в інверторах – 3–7 %
- втрати, пов'язані зі зростанням температури фотоелементів, – 4–8 %
- втрати в процесі роботи сонячної батареї в період низького рівня сонячного випромінювання – 1–3 %;
- втрати, пов'язані з затінюванням і забрудненням сонячних батарей, – 1–3 % (у разі неоптимального орієнтування ці втрати можуть бути значно вище);
- втрати шунтуючих діодів – 0,5 %.

На практиці можливі випадки, коли загальні втрати можуть досягати 25–30 % через погану якість обладнання або неправильний підбір компонентів системи та інших факторів. Зокрема зі збільшенням температури фотоелектричного елемента на

1 °С його ефективність падає в середньому на 0,5 %. Ця залежність нелінійна і підвищення температури елемента на 10 °С призводить до зниження ефективності майже в два рази.

Фотоелектричні системи слід встановлювати з урахуванням втрат, а вироблену енергію слід споживати у максимально наближеній до джерела зоні [3, 8].

Інвертор і відповідні електричні компоненти, необхідні для під'єднання до мережі, є факторами, що генерують ці втрати [4], а параметр називається втрат L_s і показує різницю між виходом масиву Y_a та кінцевим виходом системи Y_F :

$$L_s = Y_a - Y_F. \quad (1)$$

Втрати від затінення. Одним з найважливіших факторів, що впливає на експлуатаційні характеристики фотоелектричних панелей, є затінення [7]. Факторами, які можуть спричинити затінення, є сусідні будівлі, чагарники та вежі для передачі енергії тощо. Як правило, будівлі будуються дуже близько одна до одної, особливо в центрах міста, і це спричиняє затінення фотоелектричних модулів, тим більше встановлених на дахах. Іноді через неправильну конструкцію проектування масиву фотоелектричної системи можливе також самозатінення [3].

Втрати від пилу. Ці втрати спричинені забрудненням поверхні фотоелектричного модуля з будь-якої причини, або зменшенням надходження сонячної радіації через скупчення снігу на поверхні модуля. Результати досліджень, зроблені щодо втрат, спричинених запиленням, показують, що в районах, де мало опадів, ці втрати досягають 15 %. Для підвищення ефективності системи модуль потрібно регулярно очищати [7]. Але на великій сонячній електростанції, особливо в районах з нестачею води, цей процес може бути дуже дорогим [3].

Втрати на відбиття. Поки фотомодуль поглинає частину сонячної радіації, певна кількість сонячної радіації відбивається назад від поверхні модуля. Цей процес характеризується втратами на

$$p(\theta_1) = (1/2) \left[\left(\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + 1 \right) + \left(\frac{tg^2(\theta_2 - \theta_1)}{tg^2(\theta_2 + \theta_1)} + 1 \right) \right]. \quad (2)$$

Для зменшення відбиття поверхні модуля вкривають антивідбиваючою плівкою [3].

Теплові втрати. Сонячні панелі випробовуються в стандартних умовах випробувань, що відповідають 25 °С, 1000 Вт/м² сонячної радіації та АМ 1,5 (маса повітря). Ефективність панелі розраховується відповідно до стандартних умов випробування. Частина падаючого

відбиття через зворотне відбите випромінювання. Здатність скла віддзеркалювати промені, які падають на нього під кутом θ_1 , визначається за формулою

сонячного випромінювання перетворюється в електричну енергію, а частина сонячної радіації – на теплову енергію. Ефективність фотоелектричної батареї зменшується зі збільшенням температури панелі [3]. Теплова поведінка поля, яка сильно впливає на електричні характеристики, визначається енергетичним балансом між температурою навколишнього середовища і нагріванням елемента через сонячне випромінювання:

$$U \cdot (T_{cell} - T_{amb}) = Alpha \cdot G_{inc} \cdot (1 - Effic) \quad (3)$$

$$T_{cell} = T_{amb} + 1/U \cdot (Alpha \cdot G_{inc} \cdot (1 - Effic))'$$

де T_{amb} – температура навколишнього середовища, відповідно до метеоданих;

G_{inc} – випромінювання модуля або PV-масиву (в моделюванні використовується GlobEff, ефективне випромінювання з урахуванням забруднень і відтінків);

$Alpha$ – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання (віддзеркалення). Звичайне значення коефіцієнта поглинання $Alpha$ становить 0,9;

$Effic$ – коефіцієнт корисної дії (пов'язаний з площею модуля), тобто енергія, що відводиться від модуля. За можливості коефіцієнт корисної дії PV обчислюється відповідно до умов роботи модуля. В інших випадках його значення приймається на рівні 10 %.

Втрати від невідповідності модуля.

Одним з основних джерел втрат у фотоелектричній системі є те, що різна

кількість енергії виробляється двома або більше масивами в модулі. Ця невідповідність викликана такими факторами, як часткове затінення та забруднення певного модуля, які можуть спричинити ці втрати. Значна частина системних втрат відбувається в кабелях та інверторах [3].

Втрати в кабелях. Як правило, втрати в кабелях для добре спроектованої станції не перевищують 2 %, і ця величина не повинна зростати з часом. Також причиною втрат, що відбуваються в кабелях, є корозія та перегрів. Кабелі використовуються для під'єднання модулів PV та інверторів. Втрати кабелю живлення визначаються за виразами:

$$P_{loss}(t) = 2 \cdot I_{DC_cable}^2 \cdot r_{DC}, \quad (4)$$

$$P_{loss}(t) = 2 \cdot \left(\frac{P_{DC_cable}(t)}{V_{DC}} \right)^2 \cdot r_{DC}, \quad (5)$$

де I_{DC}^2 – постійна стійкість кабелю;
 V_{DC} – напруга між кінцями кабелю;
 P_{loss} – втрати постійного струму;
 r_{DC} – опір постійного струму кабелю.

Втрати енергії через резистивні навантаження пропорційні збільшенню стійкості до проводу.

Спосіб під'єднання. Всі сонячні панелі з'єднуються послідовно для підвищення напруги відповідно до діапазону робочих напруг інвертора, під'єданого до мережі. Після стійкого з'єднання з сонячною панеллю інвертор під'єднується до трифазної електричної мережі всередині будівлі.

Моніторинг системи. Сонячна електростанція, під'єднана до мережі з

використанням інвертора, має здатність працювати стабільно, точно, довго і функцію безпроводного дистанційного моніторингу. Таким чином, всі технічні характеристики станції можуть віддалено контролюватися портативними електронними пристроями.

Об'єктом дослідження є тягова підстанція № 18 м. Зміїв (рис. 1), площа даху 378 м², на якій змонтовано чотири масиви, кожен з яких складається з десяти послідовно з'єднаних сонячних панелей марки Jinko Solar JKM305M-60 Eagle потужністю 305 Вт. Запропонована система загальною площею 65 м² під'єднується до чотирьох інверторів трифазного струму потужністю 2,9 кВт, на кожен з яких припадає по масиву.



Рис. 1. Загальний вигляд тягової підстанції № 18 м. Зміїв

Для оцінювання рівня втрат була розроблена імітаційна модель об'єкта дослідження в програмному середовищі PVsyst з такими вихідними даними: обрані сонячні панелі марки Jinko Solar JKM305M-60 Eagle 305 Вт, інвертори марки Ainelec K3 130-350 V/50Hz, задані кліматичні умови Харківської області та площа даху тягової підстанції. Обрані сонячні панелі даної

марки мають невисоку вартість і високий ККД, витримують суворі умови експлуатації, що робить їх ідеальними для встановлення на дахах тягових підстанцій та мінімізує можливості розриву сітки струмопровідних доріжок.

Обраний інвертор має максимальну ефективність 98 %.

Рівні втрат змодельовані за допомогою програмного забезпечення PVsyst, включають два типи: втрати PV array loss (втрати в масиві) і System loss (втрати в системі).

Результати досліджень. Результати модулювання, подані на рис. 2, вказують на те, що втрати електроенергії сонячних батарей, пов'язані з температурним режимом, становлять близько 4,18%. При стандартній робочій температурі сонячних панелей (25 °C) різниця з сезонними температурами в цій місцевості досить висока: влітку температура повітря може досягати 40 °C, а взимку знижуватися до

-20 °C. Найменші втрати, відповідні значенням 0,1%, спостерігаються в електричних з'єднувальних кабелях, оскільки їх довжина не перевищує 5 м, як показано на рис. 2. Втрати потужності можуть коливатися від 10 до 70% залежно від різних причин, що впливають на продуктивність фотоелектричної системи (табл. 1).

У табл. 2 відображено детальні втрати в інверторі протягом року. Найбільші втрати відзначаються у період з травня по серпень, а сумарні втрати за рік складають 829,98 кВт·год.

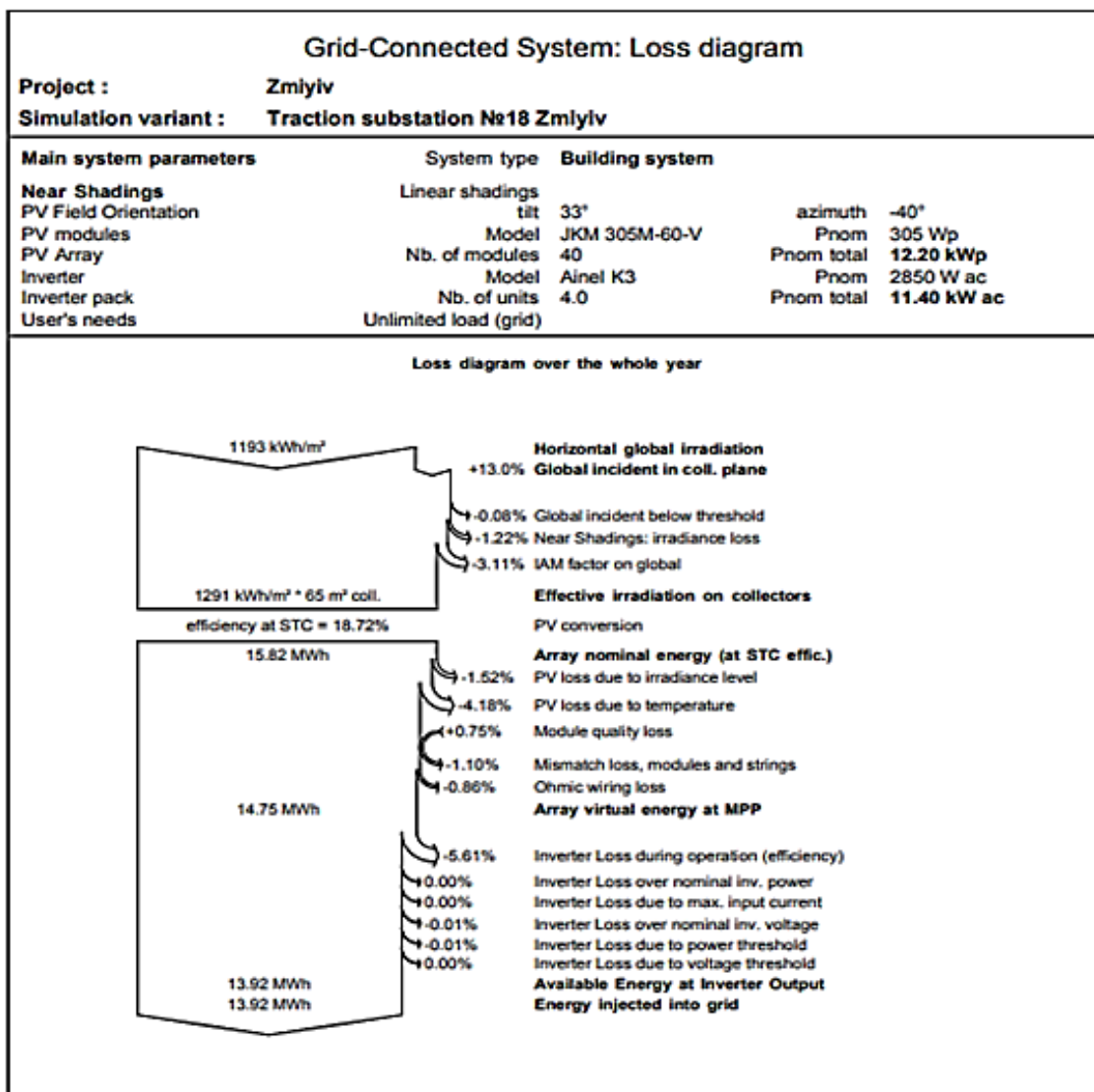


Рис. 2. Втрати фотоелектричної системи

Таблиця 1

Діаграма втрат «Тягова підстанція № 18 м. Зміїв» за рік

Параметр	Значення
Горизонтальна енергетична експозиція сумарного сонячного випромінювання	1193 кВтгод/м ²
Сумарне падіння випромінювання на поверхні	+ 13,0 %
Сумарне падіння нижче порогового рівня	-0,08 %
Поряд із зонами затінення: втрати освітлення	-1,22 %
Вплив кута падіння на сумарне значення	-3,11 %
Ефективне сонячне випромінювання на колекторах	1291 * 65 кВтгод/ м ² * м ² кол.
Фотоелектричний перетворювач, ККД при STC	18,72 %
Номінальна енергія батареї (ефективність за стандартних тестових умов)	15,82 МВтгод
Втрати фотоелемента, пов'язані з рівнем освітлення	-1,52 %
Втрати фотоелемента, пов'язані з температурними показниками	-4,18 %
Втрати, пов'язані з якістю модуля	+ 0,75 %
Схемні втрати, модулі та з'єднувальні елементи	-1,10 %
Омічні електромонтажні втрати	-0,86 %
Віртуальна енергія батареї за максимально можливою потужністю	14,75 МВтгод
Втрати інвертора під час роботи (ефективність)	-5,61 %
Втрати інвертора через захист від понадрозрахункової потужності	0,00 %
Втрати інвертора через максимальний вхідний струм	0,00 %
Втрати інвертора через захист від понадрозрахункової напруги	-0,01 %
Втрати інвертора через порогове значення рівня потужності	-0,01 %
Втрати інвертора через порогове значення рівня напруги	0,00 %
Енергія, доступна для використання на виході з інвертора	13,92 МВтгод
Енергія, передана до мережі	13,92 МВтгод

Таблиця 2

Детальні втрати в інверторах

	EOutInv kWh	EffInvR %	InvLoss kWh	IL_Oper kWh	IL_Pmin kWh	IL_Pmax kWh	IL_Vmin kWh	IL_Max kWh
January	640	94.1	40.29	39.71	0.056	0.000	0.526	0.000
February	902	94.6	51.70	51.15	0.238	0.000	0.305	0.000
March	1262	94.7	70.78	70.66	0.122	0.000	0.000	0.000
Aprile	1312	94.3	79.88	79.70	0.180	0.000	0.000	0.000
May	1731	94.6	99.12	98.89	0.234	0.000	0.000	0.000
June	1584	94.3	95.07	94.87	0.198	0.000	0.000	0.000
July	1719	94.6	98.35	98.28	0.078	0.000	0.000	0.000
August	1618	94.7	90.91	90.71	0.199	0.000	0.000	0.000
September	1220	94.5	71.45	71.14	0.307	0.000	0.000	0.000
October	879	93.9	57.04	56.99	0.052	0.000	0.000	0.000
November	573	93.5	40.09	39.90	0.190	0.000	0.000	0.000
December	475	93.1	35.31	35.08	0.042	0.000	0.182	0.000
Year	13916	94.4	829.98	827.07	1.896	0.000	1.013	0.000

Втрати знижують кількість енергії, переданої до мережі, та ефективність роботи електростанції, під'єднаної до мережі. Як показано на рис. 3, втрати потужності, пов'язані з сонячними панелями, складають $\sim 0,38$ кВт·год/кВт·доб на добу, в той час, як втрати в системі – близько 0,19 кВт·год/кВт·доб.

При цьому корисна вихідна потужність інвертора – близько 3,13 кВт·год/кВт·доб. На рис. 4 показана

продуктивність сонячної електростанції, ККД якої в середньому становить 84,6 %.

Потужність, що була передана до мережі сонячною електростанцією, відповідає кількості сонячної радіації (рис. 4). З травня по вересень виробляється найбільша кількість електроенергії, в січні і лютому – найменше.

На рис. 5 показана залежність втрат та вироблення енергії в сонячній електростанції за місяцями.

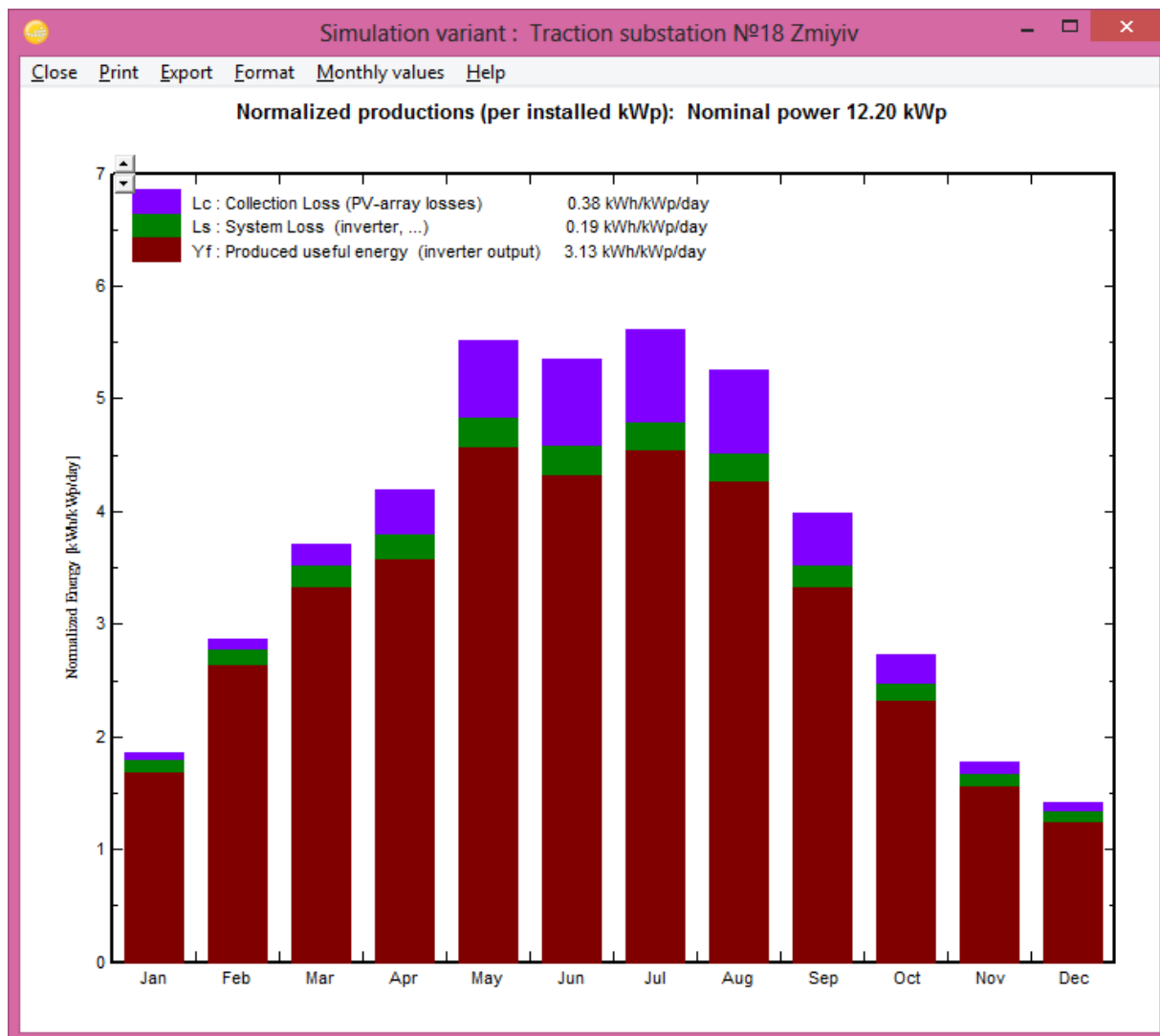


Рис. 3. Розподіл втрат потужності за місяцями

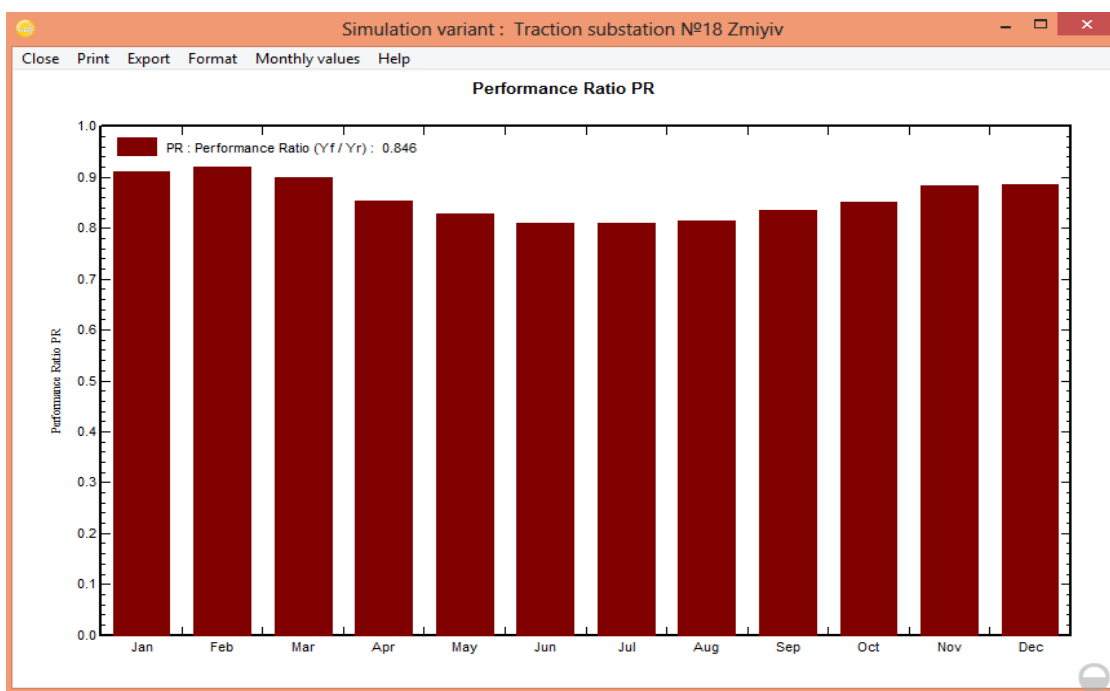


Рис. 4. Продуктивність досліджуваної сонячної електростанції

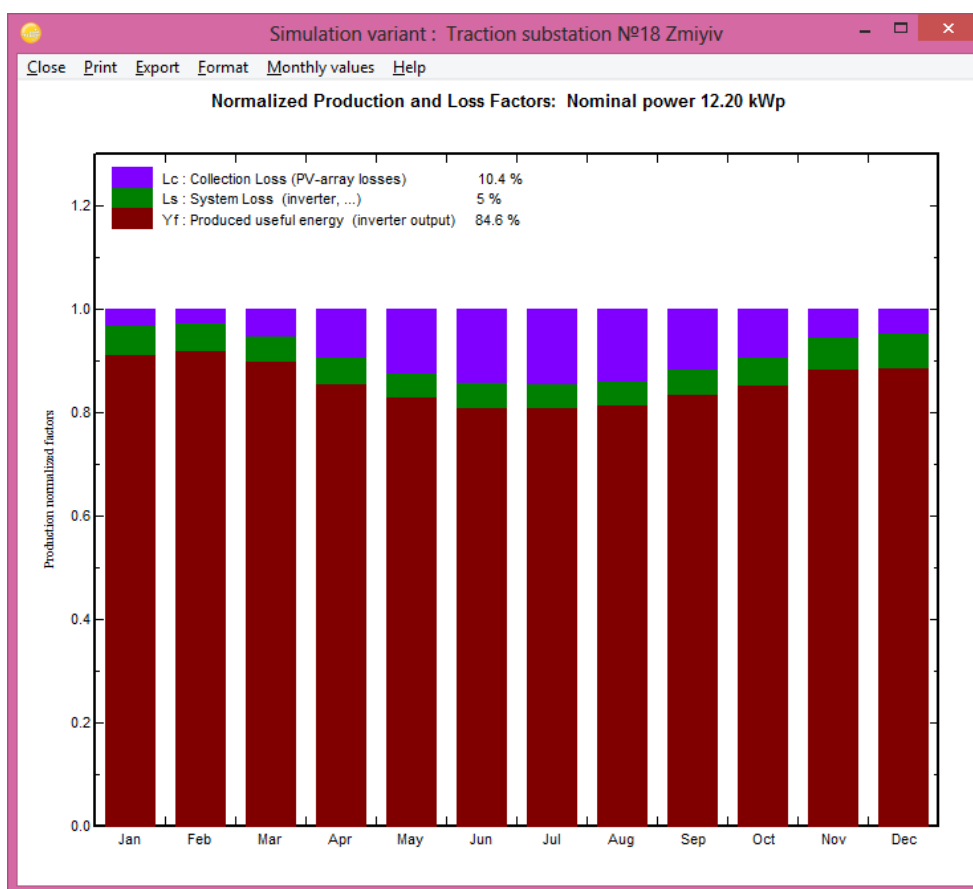


Рис. 5. Нормалізоване вироблення та фактори втрат при номінальній потужності сонячної електростанції

Найбільші втрати в електростанції обумовлені втратами у фотоелектричній системі, а в період з травня по серпень спостерігається падіння виробітку продуктивності енергії приблизно на

10,4 %, що зумовлено нагріванням сонячних панелей. Системні втрати, до яких входять такі фактори, як затінення, пил, опади, температури та втрати у кабелях, інверторах та акумуляторах, складають 5 % (табл. 3).

Таблиця 3

Кількість електроенергії, отриманої від під'єднаної до мережі сонячної електростанції

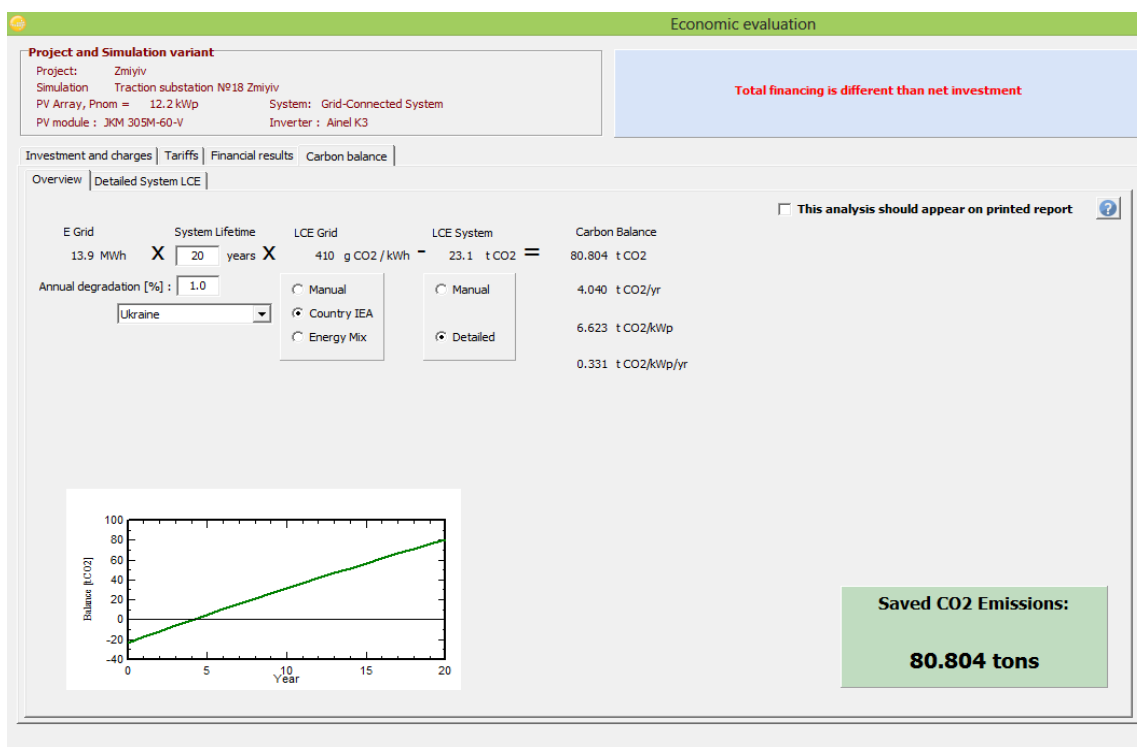
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR
January	36.9	22.32	-5.24	57.5	54.3	680	640	0.912
February	56.8	30.52	-4.86	80.4	76.6	953	902	0.920
March	94.6	50.22	0.72	115.1	110.4	1333	1262	0.899
Aprile	117.6	63.30	9.83	125.9	120.9	1392	1312	0.854
May	166.8	77.50	16.58	171.2	164.4	1830	1731	0.829
June	163.8	80.70	20.21	160.4	153.7	1679	1584	0.810
July	172.4	79.98	22.71	174.1	167.1	1818	1719	0.809
August	151.3	69.13	22.13	162.9	156.7	1709	1618	0.814
September	104.7	51.60	16.21	119.7	114.9	1291	1220	0.836
October	65.1	35.03	9.06	84.5	80.6	936	879	0.852
November	35.7	22.20	0.55	53.2	50.3	613	573	0.883
December	27.9	17.98	-4.57	43.9	41.1	510	475	0.886
Year	1193.5	600.48	8.69	1348.8	1290.9	14745	13916	0.846

Примітка: GlobHor – горизонтальне глобальне випромінення;
 T_Amb – середні температури навколишнього середовища;
 GlobInc – глобальне інцидент випромінення в площині колектора;
 GlobEff – ефективна глобальна корекція затінь;
 EArray – ефективна енергія на виході масиву;
 T_Amb – середні температури навколишнього середовища;
 E_Grid – енергія, що вводиться до мережі

Також була розрахована енергія, генерована PV-масивом, та енергія, що вводиться до мережі, включаючи втрати в електричних компонентах та PV-масиві. Щорічне глобальне випромінення на горизонтальній площині – 1193,5 кВт·год/м², 1348,8 кВт·год/м² – для глобальної спадної енергії на колекторі без оптичних поправок і 1290,9 кВт·год/м² – для ефективного глобального випромінення після оптичних втрат, які були розраховані для конкретного місця розташування. При цьому випромінена річна енергія постійного

струму, що генерується з фотоелектричної решітки, становила 14745 кВт·год, а річна енергія змінного струму, що вводиться до мережі, становила 13916 кВт·год.

Відповідно до поточного графіка підвищення цін на електроенергію в Україні інвестиції в будівництво на дахах будівель сонячних електростанцій, під'єднаних до мережі, можуть бути економічно доцільними, роблячи при цьому позитивний вклад у захист довкілля і боротьбу зі зміною клімату за рахунок зменшення викидів CO₂ (рис. 6).

Рис. 6. Зменшення викидів CO₂

Висновки. У статті розглянуто і проведено аналіз втрат в сонячній електростанції встановленій на тяговій підстанції постійного струму № 18 м. Зміїв Харківського регіону зі всіма кліматичними умовами даного регіону.

Проаналізовано показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях. За допомогою програмного комплексу PVsyst були виміряні втрати енергії, які генерує сонячна електростанція. Встановлено, що втрати потужності у розглянутій сонячній електростанції, пов'язані з сонячними панелями, склали $\sim 0,44$ кВт·год/кВт·доб, у той час як втрати в системі – близько

0,19 кВт·год/кВт·доб.

Втрати електроенергії сонячних батарей, пов'язані з температурним режимом, становлять близько 4,18 %. Найменший рівень втрат 0,1 %, спостерігається в електричних з'єднувальних кабелях, оскільки їх довжина не перевищує 5 м.

Отримано залежність вихідної потужності, кількості переданої до мережі електроенергії та ефективності роботи сонячних електростанцій від різних типів втрат. Втрати знижують кількість енергії, переданої до мережі, та ефективність роботи електростанції, тому для подальшого дослідження є актуальним пошук варіантів зменшення втрат енергії в сонячній електростанції.

Список використаних джерел

1. Бацала Я. В., Гладь І. В., Николин У. М. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 4. С. 81-90. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/trngr_2013_4_11.

2. Нгуен Т. Н., Сизов В. Д., Ву М. Ф., Ку Т. Т. Х. Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое. *Энергетика. Известия высших учебных*

заведений и энергетических объединений СНГ. 2020, 63(1). С. 30-41. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>.

3. Ekici S. and Kopru M. A. Investigation of PV System Cable Losses. *International journal of renewable energy research*. 2017, Vol. 7, No. 2. P. 807–815.

4. Vidal Humberto, Rivera Marco, Wheeler Patrick and Vicencio Nicolás. The Analysis Performance of a Grid-Connected 8.2 kWp Photovoltaic System in the Patagonia Region Sustainability. 2020, № 12 (21), 9227. URL: <https://doi.org/10.3390/su12219227>.

5. Кожем'яко В. П., Маліновський В. І., Ярославський Я. І. Застосування технологій фотоелектричних перетворювачів в моделі інформаційних мереж із розподіленими джерелами енергії. *Опт-ел. інф-енерг. техн.* 2014. № 26. Вип. 2. С. 96–108.

6. Shiva Kumar B., Sudhakar K. Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. November 2015. P. 184–192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.10.001>.

7. Maghami M. R., Hizam H., Gomes C., Radzi M. A., Rezadad M. I. and Hajighorbani S. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1307–1316.

8. Salema F., Awadallah M. A. Detection and assessment of partial shading in photovoltaic arrays. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2016. Vol. 3 (1). P. 23–32.

Панченко Владислав Вадимович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Тел.: +38(057)730-10-04. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Харін Руслан Олександрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X. Тел.: +38(057) 730-10-76. E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

Panchenko Vladislav, PhD (Tech). Associate Professor, department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Tel.: +38(057)730-10-04. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Kharin Ruslan, postgraduate student, department of department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X. Tel.: +38(057)730-10-76. E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

Статтю прийнято 10.06.2021 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.212.5

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГРАВІТАЦІЙНО-ПРИЦІЛЬНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ВІДЧЕПІВ

Д-р техн. наук О. М. Огар, кандидати техн. наук І. В. Берестов, М. Ю. Куценко, інженер Т. Т. Берестова, магістрант В. В. Рабін

DETERMINATION OF THE CONDITIONS FOR APPLYING THE TECHNOLOGY OF TARGET GRAVITY BRAKING OF UNCOUPLED CARS

Dr. Sc. (Tech.) O. Ohar, PhD (Tech.) I. Berestov, PhD (Tech.) M. Kutsenko, engineer T. Berestova, master V. Rabin.

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242270>

***Анотація.** Робота спрямована на визначення умов застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів, реалізація якої можлива за наявності спеціального профілю сортувального пристрою без гальмових позицій на спускній частині. Обґрунтування умов застосування цієї технології базується на аналізі результатів розрахунку показників процесу скочування розрахункових вагонів при різних значеннях швидкості розпуску, швидкості і напрямку вітру. Основними причинами незастосовності запропонованої технології є перевищення допустимої швидкості руху вагонів по стрілочних переводах і перевищення допустимої швидкості їх входу на уповільнювачі паркової гальмової позиції.*

***Ключові слова:** сортувальний пристрій, гравітаційно-прицільне гальмування відчепів, поздовжній профіль, розпуск вагонів.*

***Abstract.** Improving the efficiency of the process of train uncoupling remains one of the most urgent problems in railway transport. The priority areas for solving this problem today include the development and implementation of integrated automation systems for hump technologies, the use of artificial intelligence in decision support systems and procedures for calculating the control parameters of car retarders. These systems provide high accuracy in designing and implementing control actions, taking into account indeterminacy and multiple random parameters.*

However, a number of factors that are quite difficult to take into account, predict, or formalize. Such factors include the technical condition of rail car retarders, their random braking characteristics, constant changes in wind speed and direction, the condition of wheel pairs, the response rate of hump operators, and others. These factors can have significant impact on the quality of the marshalling process, even on automated marshalling humps.

To increase the efficiency of the train uncoupling technology, researchers have developed a number of scientific approaches and technical solutions: approaches to control using the equipment for controlling the speed of rolling uncoupled cars in automated mode have been formed, new designs of car retarders have been developed and the existing ones were improved, optimizing methods for braking modes of uncoupled cars, the longitudinal profile of marshalling humps and the design of hump necks have been proposed.

The introduction of target gravity braking technology for uncoupled cars is one of the ways to improve the efficiency of the marshalling process. This technology can be implemented provided that a special profile design of the marshalling device is used.

To determine the conditions for applying the target gravity braking technology for uncoupled cars, simulation modeling of rolling of model cars in favorable and unfavorable meteorological conditions was carried out.

The results of simulation modeling showed that the proposed technology can be definitely used, if the number of tracks in the marshalling yard is up to 32 and estimated wind speeds up to 6 m/s, when it provides an uncoupling rate of up to 1,8 m/s. If the marshalling yard has a larger number of tracks and/or in case of powerful winds, the technology can be applied if the uncoupling rate is reduced. In this case, the feasibility of using the technology should be verified with technical and economic calculations.

Keywords: marshalling system, target gravity car braking, longitudinal profile, uncoupling of cars.

Вступ. Підвищення ефективності процесу розформування составів залишається однією з актуальних проблем на залізничному транспорті. Пріоритетними напрямками рішення вказаної проблеми на сьогодні є розроблення та впровадження систем комплексної автоматизації гіркових технологічних процесів, застосування штучного інтелекту в системах підтримки прийняття рішення і процедурах розрахунку параметрів керування вагонними уповільнювачами. Ці системи забезпечують високу точність розрахунку та реалізації керуючих дій з урахуванням невизначеності та наявності великої кількості параметрів, що мають випадкову природу.

Однак є ряд факторів, які досить складно врахувати, спрогнозувати або формалізувати. Такими факторами є технічний стан вагонних уповільнювачів, їх випадкові гальмові характеристики, постійна зміна швидкості і напрямку вітру, стан колісних пар вагонів, швидкість реакції операторів гірки та інші. Зазначені фактори можуть суттєво впливати на якість сортувального процесу навіть на автоматизованих сортувальних гірках.

Гірка є дуже складною системою, що складається з великої кількості взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів та функціонує в умовах впливу множини зовнішніх і внутрішніх випадкових факторів. Виходячи з цього, певну складність має

завдання формування математичних моделей гіркових технологічних процесів, що враховують всі особливості функціонування гірки та забезпечують велику точність конструктивних і технологічних розрахунків. Слід зазначити, що на сьогодні закінченого рішення цього завдання поки що нема.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для підвищення ефективності процесу розформування составів розроблено ряд наукових підходів і технічних рішень, а саме сформовано підходи до управління засобами регулювання швидкості скочування відчепів в автоматизованому режимі [1–3], розроблено нові та удосконалено існуючі конструкції вагонних уповільнювачів [4, 5], запропоновано методи оптимізації режимів гальмування відчепів [6–8], поздовжнього профілю сортувальних гірок [9–11] і конструкції гіркових горловин [12, 13].

Основними недоліками систем комплексної автоматизації процесу розформування составів є недосконалість методів розрахунку оптимальних параметрів керуючих дій, математичних моделей скочування відчепів з гірки і способів реалізації потрібних режимів їх гальмування. Невирішеними залишаються питання урахування інерційності вагонних уповільнювачів при гальмуванні відчепів, прогнозування їх гальмових сил, ходових якостей вагонів і параметрів метеорологічних умов. Застосування

елементів штучного інтелекту для визначення ефективних режимів гальмування відчепів на позиціях гірки теж не дозволяє досягти високих якісних показників сортувального процесу.

Разом з тим слід відзначити, що нові конструкції вагонних уповільнювачів характеризуються більшою надійністю і швидкістю, що є дуже важливим з позиції забезпечення більшої точності реалізації керуючих дій.

Створені методи оптимізації режимів гальмування відчепів в основному спрямовані на зменшення енерговитрат на регулювання швидкості їх скочування. Варто відзначити, що ці витрати складають невелику частку витрат сортувальних пристроїв за життєвий цикл їх експлуатації і, можливо, зазначену оптимізацію слід виконувати за іншими, більш значущими критеріями.

Для оптимізації профілю гірок і конструкції їх горловин вчені використовували окремі якісні показники. При цьому вони не аналізували ступінь їх впливу на загальносистемний ефект.

Таким чином, для підвищення ефективності процесу розформування

составів потребує вирішення ряд складних проблем. Й одним з рішень цих проблем може бути розроблення нових технологій регулювання швидкості скочування відчепів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даного дослідження є визначення умов застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів. Впровадження даної технології в певних умовах експлуатації дозволить підвищити ефективність процесу розформування составів.

Основними завданнями дослідження є проведення імітаційного моделювання процесу скочування розрахункових вагонів у заданих метеорологічних умовах і розроблення рекомендацій щодо умов застосування запропонованої технології.

Основна частина дослідження. Впровадження технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів є одним із шляхів підвищення ефективності сортувального процесу. Зазначена технологія може бути реалізована за умови застосування спеціальної конструкції профілю сортувального пристрою (рис. 1).

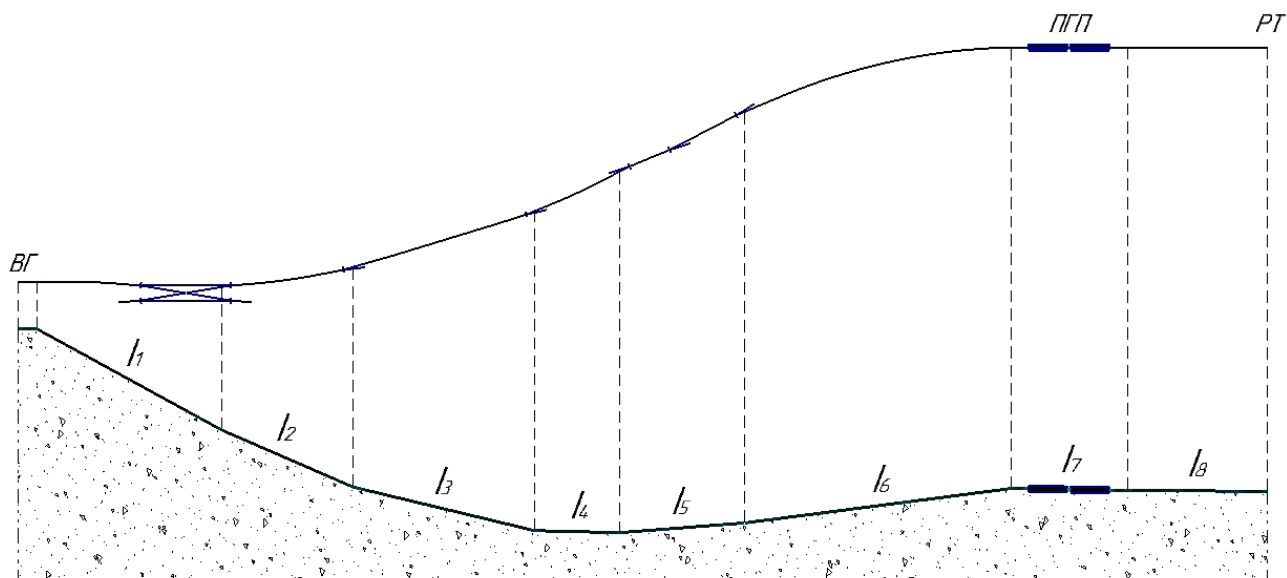


Рис. 1. Поздовжній профіль сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів

Така конструкція характеризується розміщенням на підйомі стрілочної зони (СЗ) і ділянці сортувальних колій до паркової гальмової позиції (ПГП). В окремих випадках на підйомі може розміщуватися тільки частина СЗ. Інші елементи поздовжнього профілю по маршруту скочування відчепів від вершини гірки (ВГ) до розрахункової точки (РТ) розташовуються на спуску.

Конструктивні параметри сортувального пристрою мають забезпечувати виконання таких умов:

- докочування повільного легкого бігуна (ПЛ) в зимових несприятливих умовах від ВГ до РТ найбільш трудної за опором колії;

- достатні інтервали на роздільних стрілочних переводах у сполученні ПЛ – ШВ ($\delta_{ПЛ-ШВ}$), де ШВ – швидкий важкий бігун.

Обмеженням у застосуванні запропонованого пристрою є перевищення швидкості руху вагонів по стрілочних переводах, що розміщені на спускній частині, і (або) допустимої швидкості входу вагонів на уповільнювачі ПГП. На спускній частині пристрою укладено симетричні стрілочні переводи з маркою хрестовини 1/6. Рух по цих стрілочних переводах дозволено зі швидкістю, що не перевищує 40 км/год, або 11,1 м/с. Допустима швидкість входу вагонів на сучасні уповільнювачі складає 8 м/с і 8,5 м/с. Для подальших досліджень за верхню межу швидкості входу вагонів на уповільнювачі ПГП прийнято швидкість 8,5 м/с.

Для визначення умов застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів проведено імітаційне моделювання скочування розрахункових вагонів (ПЛ, ШВ) у розрахунковому

сполученні ПЛ – ШВ у сприятливих і несприятливих метеорологічних умовах при початкових швидкостях їх розпуску (V_0) 1,4 м/с, 1,6 м/с і 1,8 м/с та швидкостях вітру (V_B) 4 м/с, 6 м/с і 8 м/с.

Моделювання зазначеного процесу виконано при таких вихідних даних:

- кількість колій у сортувальному парку – 32;

- маса ШВ – 85 т;

- основний питомий опір ШВ – 0,5 Н/кН;

- маса ПЛ – 22 т;

- основний питомий опір ПЛ – 4,5 Н/кН;

- розрахункова температура зовнішнього повітря у несприятливих умовах скочування вагонів – -15°C , у сприятливих – $+30^\circ\text{C}$;

- розрахункова швидкість вітру у сприятливих умовах скочування вагонів – 8 м/с;

- кут між віссю колії на ВГ і поздовжньою віссю сортувального парку – $0,41^\circ$;

- кількість елементів поздовжнього профілю від ВГ до РТ – 8;

- ухил першого (швидкісного) елемента профілю (I_1) – 50‰ ;

- ухил елемента профілю, на якому розміщено ПГП, (I_7) – $1,5\text{‰}$;

- ухил сортувальних колій від кінця ПГП до РТ (I_8) – $0,6\text{‰}$.

Висоту (H) і поздовжній профіль сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів для заданих умов експлуатації і при припущенні, що різниця ухилів другого (I_2) і третього (I_3), третього і четвертого (I_4) елементів профілю максимальна (25‰), розраховано з використанням такої оптимізаційної моделі:

$$H = \left(\begin{array}{l} 50 \cdot l_1 + I_2 \cdot l_2 + (I_2 - 25) \cdot l_3 + (I_2 - 50) \cdot l_4 + \\ + I_5 \cdot l_5 + I_6 \cdot l_6 + 1,5 \cdot l_7 + 0,6 \cdot l_8 \end{array} \right) \cdot 10^{-3} \rightarrow H_{\min}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} 25 \leq I_2 \leq 105; \\ I_4 - I_5 \leq 25, I_5 - I_6 \leq 25; \\ h_{\omega}^{ПЛ}(I_2, I_5, I_6) = H + h_o^{ПЛ}; \\ \delta_{ПЛ-ШВ}^{СТР}(I_2, I_5, I_6) = 1, \end{cases} \quad (2)$$

де I_5, I_6 – ухили п'ятого і шостого елементів поздовжнього профілю, ‰;

l_1, \dots, l_8 – довжина першого, ..., восьмого елементів поздовжнього профілю, м;

H_{\min} – мінімально можлива висота сортувального пристрою, м;

$h_{\omega}^{ПЛ}(I_2, I_5, I_6)$ – витрачена енергетична висота ПЛ на подолання всіх видів опору при скочуванні у несприятливих метеорологічних умовах від ВГ до РТ важкої за опором руху колії, м.ен.в.;

$h_o^{ПЛ}$ – початкова енергетична висота ПЛ на ВГ, м.ен.в.;

$\delta_{ПЛ-ШВ}^{СТР}(I_2, I_5, I_6)$ – інтервал на останньому стрілочному переході при скочуванні ПЛ на важку за опором руху колію і ШВ на суміжну з нею колію, с.

Для зменшення обсягу обчислень визначено кут між напрямком вітру і поздовжньою віссю сортувального парку (β), при якому має місце найбільший і найменший опір руху вагонів від середовища і вітру при скочуванні їх від ВГ до РТ. За виконаними дослідженнями, цей кут для несприятливих метеорологічних умов складає $36,5^\circ$, для сприятливих – 200° .

Результати імітаційного моделювання скочування розрахункових вагонів (рис. 2–4) доводять, що можливість застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відцепів суттєво залежить від розрахункових метеорологічних умов. Так, швидкість скочування ШВ по спускній частині у сприятливих метеорологічних умовах не перевищує допустиму швидкість руху по симетричних стрілочних переходах

при початкових швидкостях розпуску до 1,53 м/с і висоті пристрою, розрахованій за умовою докочування ПЛ від ВГ до РТ при температурі зовнішнього повітря -15°C , $\beta = 36,5^\circ$ і $V_B = 8$ м/с (рис. 2). При висотах сортувального пристрою, розрахованих при швидкостях зустрічного вітру 6 м/с і 4 м/с, допустима швидкість руху ШВ по стрілочних переходах забезпечується при початкових швидкостях розпуску відповідно до 1,79 м/с і до 2 м/с.

Аналогічна ситуація спостерігається зі швидкістю входу вагонів на ПГП (рис. 3). При висотах сортувального пристрою, розрахованих при швидкостях зустрічного вітру 4 м/с, 6 м/с і 8 м/с, допустима швидкість входу ШВ у сприятливих метеорологічних умовах забезпечується при швидкостях розпуску відповідно до 2,8 м/с, 1,9 м/с і 0,75 м/с.

Залежності, наведені на рис. 4, свідчать про те, що при висоті сортувального пристрою, розрахованій при швидкості вітру до 6,2 м/с, застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відцепів обмежує допустима швидкість руху вагонів по симетричних стрілочних переходах, а при висоті сортувального пристрою, розрахованій при швидкості вітру більше 6,2 м/с, – допустима швидкість входу вагонів на уповільнювачі ПГП.

З огляду на отримані результати, можна зробити висновок, що при більшій кількості колій у сортувальному парку запропонована технологія може застосовуватись тільки на місцевостях зі слабкими вітрами у несприятливих для скочування вагонів періоди року.

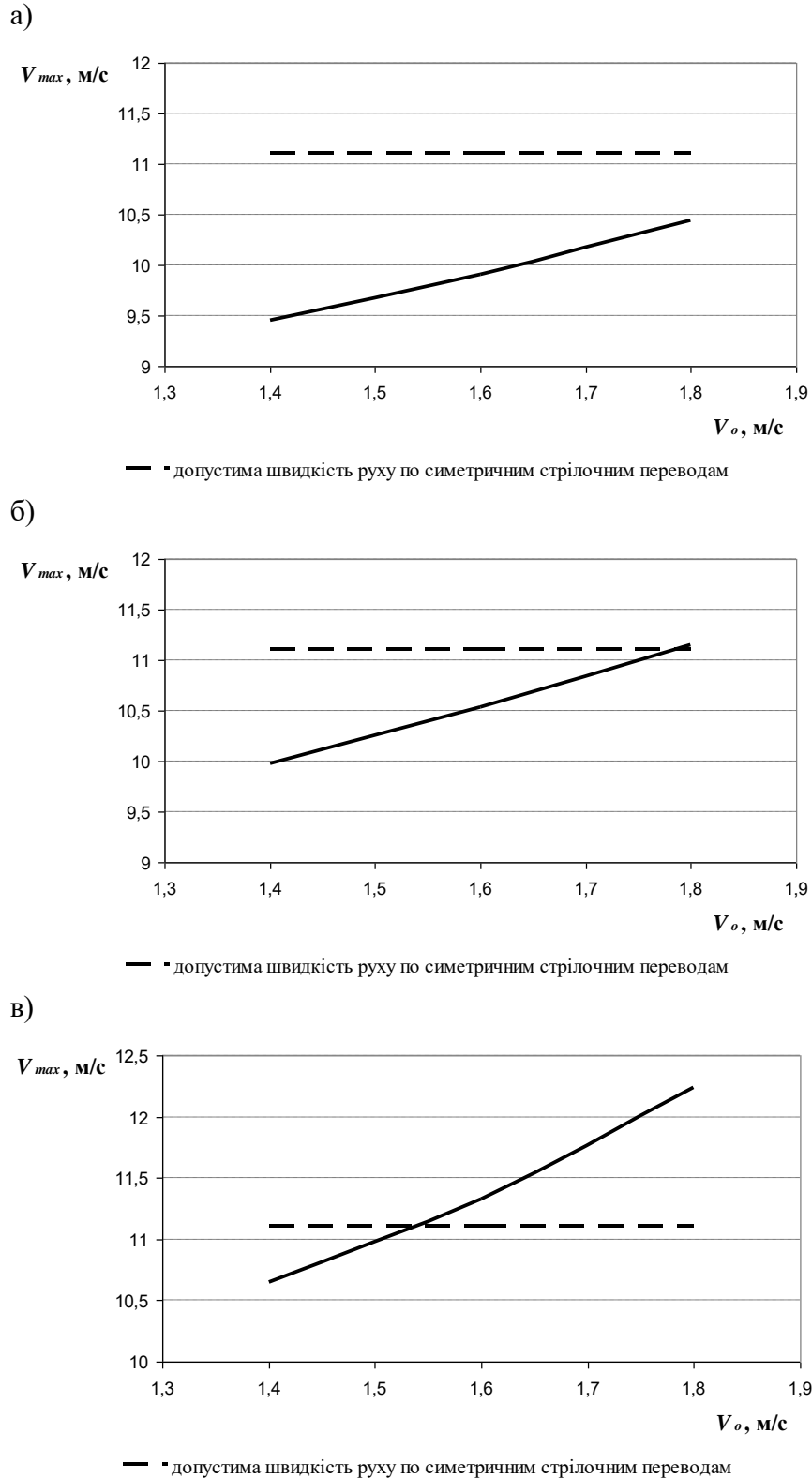


Рис. 2. Залежність максимальної швидкості скочування ШВ на спускній частині у сприятливих метеорологічних умовах (V_{max}) від початкової швидкості розпуску:
 а – при швидкості вітру, що прийнята для розрахунку висоти пристрою, 4 м/с;
 б – при швидкості вітру, що прийнята для розрахунку висоти пристрою, 6 м/с;
 в – при швидкості вітру, що прийнята для розрахунку висоти пристрою, 8 м/с

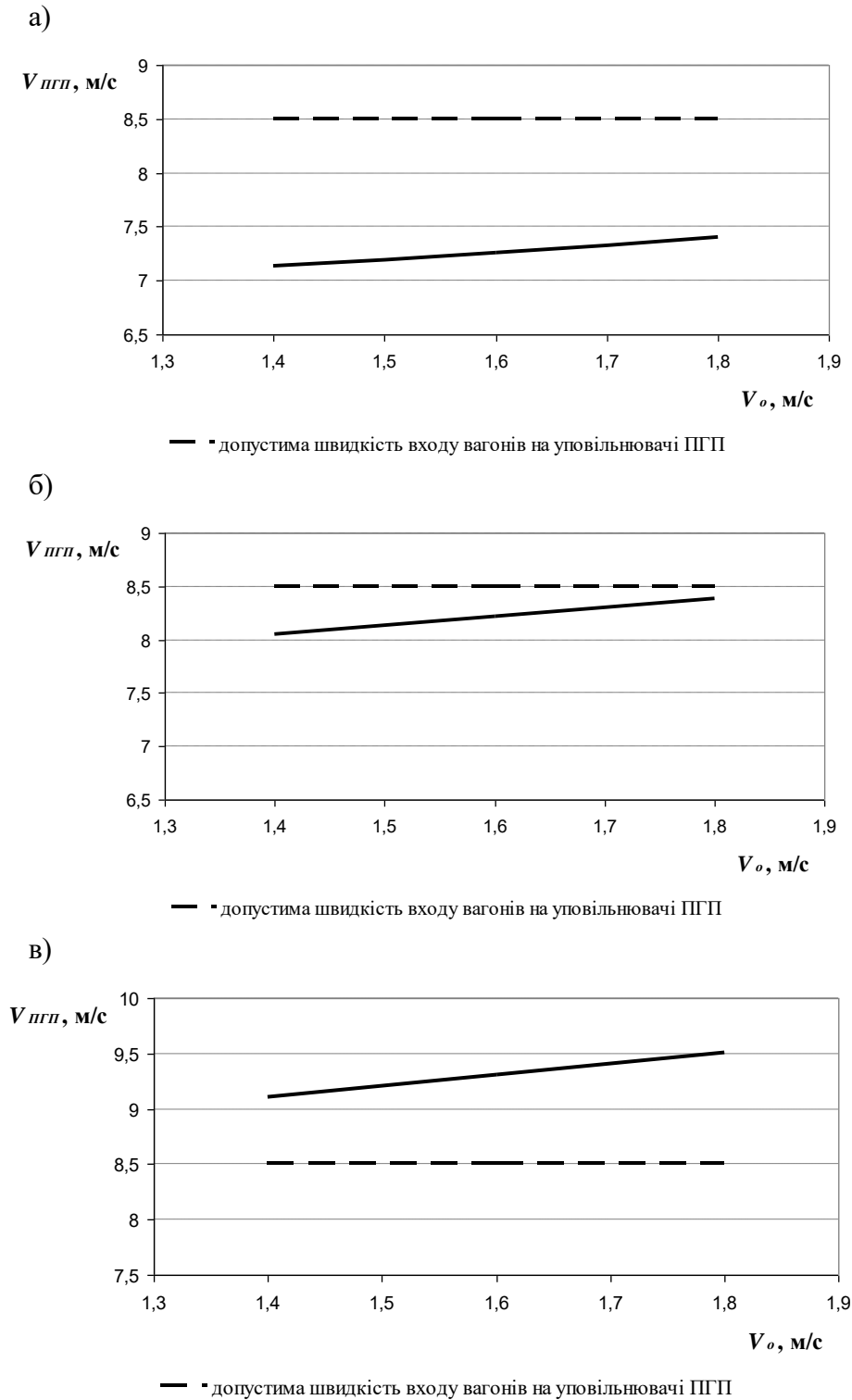


Рис. 3. Залежність швидкості входу ШВ на ПГП ($V_{пгп}$) у сприятливих метеорологічних умовах від початкової швидкості розпуску:

- а – при швидкості вітру, що прийнята для розрахунку висоти пристрою, 4 м/с;
- б – при швидкості вітру, що прийнята для розрахунку висоти пристрою, 6 м/с;
- в – при швидкості вітру, що прийнята для розрахунку висоти пристрою, 8 м/с

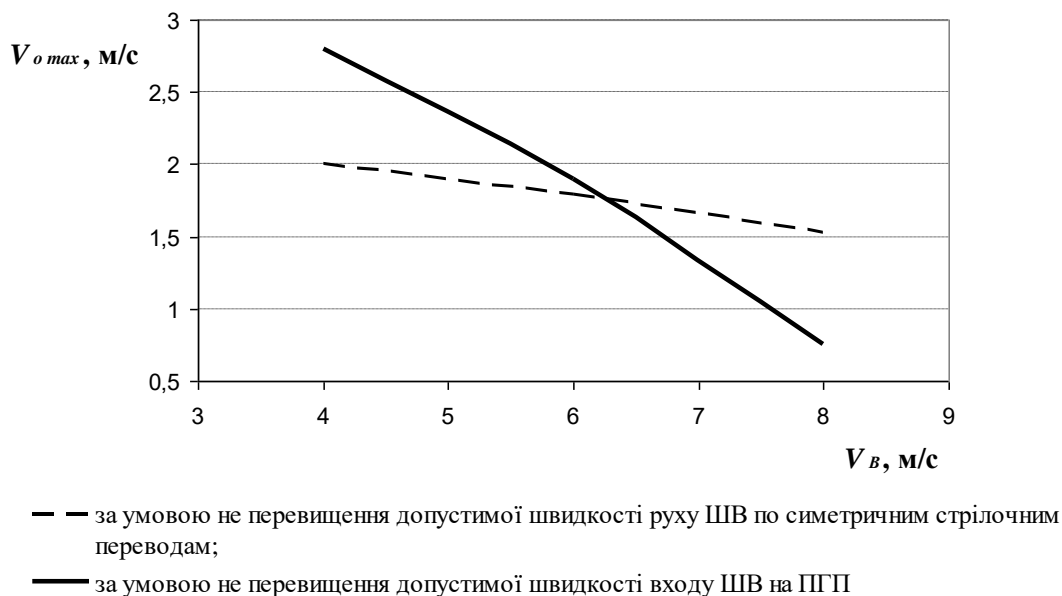


Рис. 4. Залежність максимальної швидкості розпуску вагонів ($V_{0\max}$) від швидкості вітру, що прийнята для розрахунку висоти пристрою

Висновки. Результати імітаційного моделювання процесу скочування розрахункових вагонів від вершини гірки до розрахункової точки в заданих метеорологічних умовах дають підставу сформулювати такі рекомендації щодо умов застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів:

- 1) кількість колій у сортувальному парку – до 32;
- 2) розрахункова швидкість вітру – до 6 м/с.

Аналіз отриманих результатів доводить, що запропонована технологія дозволяє реалізувати досить високу швидкість розпуску вагонів (до 1,8 м/с) і відповідно забезпечити переробку значного обсягу вагонопотоку.

З огляду на отримані залежності, слід також відзначити, що технологія гравітаційно-прицільного гальмування відчепів може застосовуватись і при більшій кількості колій у сортувальному парку і (або) більш потужних вітрах. В таких випадках доцільність застосування технології рекомендується перевіряти

шляхом техніко-економічних розрахунків, оскільки зі зменшенням швидкості розпуску збільшуються витрати дизельного палива на насув і розформування составів та додаткові витрати, пов'язані з простоем составів у парку приймання в очікуванні розформування.

Застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів має ряд переваг порівняно з традиційною технологією гальмування:

1) суттєво спрощується технологія регулювання швидкості скочування відчепів: нема необхідності гальмувати відчепа на спускній частині;

2) в умовах застосування систем комплексної автоматизації гіркових технологічних процесів автоматизується робота тільки паркової гальмової позиції;

3) суттєво зменшується вплив зовнішніх і внутрішніх випадкових факторів, що позитивно впливає на безпеку сортувального процесу;

4) зменшується вплив «людського» фактора на ефективність процесу розформування составів.

Попередня оцінка економічної ефективності застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів доводить, що в умовах автоматизації сортувального процесу витрати за розрахунковий період 10 років з приведенням вартісних оцінок результатів і витрат різних років до першого року на 20 % менші, ніж при застосуванні традиційної технології регулювання швидкості скочування відчепів.

З метою підвищення економічної ефективності запропонованої технології подальші дослідження необхідно спрямувати на оптимізацію плану колійного розвитку сортувального пристрою та удосконалення процедур розрахунку параметрів керування вагонними уповільнювачами паркової гальмової позиції.

Список використаних джерел

1. Шелухин В. И. Универсальный модуль управления тормозными позициями. *Автоматика, связь, информатика*. 2000. № 5. С. 12–14.
2. Шабельников А. Н., Ольгейзер И. А., Рогов С. А. Управление тормозными средствами сортировочных горок: повышение качества и эффективности. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2015. № 2. С. 74–79.
3. Shabelnikov A. N., Lyabakh N. N. Intellectualization of sorting processes control on the basis of instrumental determination of analogies. *2nd International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry, IITI 2017, Varna, Bulgaria*. 2017. P. 138–145. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68324-9_15 (last access: 01.03.2021).
4. Кобзев В. А. Новые вагонные замедлители. *Автоматика, связь, информатика*. 2009. № 10. С. 10–12.
5. Кобзев В. А. Развитие технических средств механизации сортировочных горок. *Автоматика, связь, информатика*. 2011. № 2. С. 13–14.
6. Бессоненко С. А. Режимы торможения отцепов на тормозных позициях. *Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог : сб. науч. трудов*. Новосибирск, 2007. С. 129–144.
7. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко и др. Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2010. 260 с.
8. Kozachenko D., Bobrovskyi V., Demchenko Y. A method for optimization of time intervals between rolling cuts on sorting humps. *Journal of Modern Transportation*. 2018. 26(3). P. 189–199. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-018-0161-2> (last access: 03.03.2021).
9. Research on profile optimization design method for coupling area in marshalling yard under application of heavy haul freight car / H. Zhang, H. Yang, S. Xia, J. Wang, R. Li. *Journal of the China Railway Society*. 2016. 38 (10). P. 14–19. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/tdxb201610002> (last access: 05.03.2021).
10. Бобровский В. И., Колесник А. И. Определение рациональной конструкции продольного профиля сортировочной горки. *Транспортні системи та технології перевезень: зб. наук. праць* Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012. Вип. 4. С. 19–24.
11. Бессоненко С. А. Оптимизация основных параметров сортировочной горки. *Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог: сб. науч. трудов*. Новосибирск, 2008. С. 4–25.

12. Бобровский В. И., Колесник А. И., Дорош А. С. Совершенствование конструкции плана путевого развития горочных горловин. *Транспортні системи та технології перевезень: зб. наук. праць* Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011. Вип. 1. С. 27–33.

13. Розсоха О. В. Эффективность работы сортувальних гірок при застосуванні нових гіркових горловин. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2008. 5/3 (35). С. 51–59.

Огар Олександр Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1967-5828. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua.

Берестов Ігор В'ячеславович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1209-6885. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: berestov@kart.edu.ua.

Куценко Максим Юрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6020-7749. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: kucenko@kart.edu.ua.

Берестова Тетяна Тимофіївна, провідний інженер кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: berestova@kart.edu.ua.

Рабін Вікторія Віталіївна, магістрант, група 221-ОПУТ-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту.

Ohar Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1967-5828. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua.

Berestov Igor, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1209-6885. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: berestov@kart.edu.ua.

Kutsenko Maksym, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6020-7749. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: kucenko@kart.edu.ua.

Berestova Tatiana, Senior Engineer, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: berestova@kart.edu.ua.

Rabin Victoria, master, group 221-OPUT-D19, Ukrainian State University of Railway Transport

Статтю прийнято 19.03.2021 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT**

Випуск 196

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактори Решетилова В. В., Третякова К. А.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 23.06.2021 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 14,5. Тираж 55. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейсбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.