

УДК 691.32

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.135.1234

## ЕФЕКТИВНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ФОСФОГІПСУ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

ШИНКЕВИЧ О. І.<sup>1</sup>, асп.,  
СМОЛІН Д. О.<sup>2\*</sup>, асп.

<sup>1</sup> Кафедра автомобільних доріг та аеродромів, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4-а, 65004, Одеса, Україна, тел. +38 (0939) 79-99-22, e-mail: elena\_shinkevich@ukr.net, ORCID ID: 0009-0006-2906-4958

<sup>2\*</sup> Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: smolin.d.a@i.ua, ORCID ID: 0009-0007-0586-1861

**Анотація. Постановка проблеми.** Скупчення техногенних відходів справедливо вважається одним з головних джерел забруднення біосфери, проте цю задачу раціонально розглядати як джерело додаткових ресурсів для отримання широкої гами будівельних матеріалів різного призначення. Даний підхід є не тільки раціональним, але і необхідним, оскільки сприяє збереженню природних ресурсів і економічній безпеці не тільки людини, але і флори та фауни. У даній ситуації актуальним для сучасного суспільства є питання не просто утилізації, обробки та застосування їх, а також збільшення обсягу техногенної сировини в загальному обсязі будівельних сумішей, з урахуванням санітарно-виробничої служби та безпеки життєдіяльності людини. Одним з можливих варіантів може бути розробка та впровадження щільних покриттів для відвалів, але такий підхід не сприяє звільненню родючих земель. У багатьох розвинених країнах світу ведеться будівництво доріг з фосфогіпсу. Нині високу оцінку отримала екологічна безпека та економічна ефективність доріг з фосфогіпсу, що значно здешевлює дорожнє будівництво. Однак необхідні подальші науково-дослідні розробки для розвитку перспектив дорожньо-будівельної галузі. **Мета статті** – підвищення експлуатаційно-будівельних властивостей дорожнього бетону з техногенної сировини у вигляді гіпсового в'язучого з фосфогіпсу, модифікованого комплексом поліфункціональних органічних добавок і полідисперсних мінеральних наповнювачів. На першому етапі проведено вибір і обґрунтування комплексу поліфункціональних органічних добавок, зокрема карбоксилатної гідрофобної добавки. В якості комплексу полідисперсних мінеральних наповнювачів застосовано кварцовий пісок або більш відомий як черепашник, воластонітові мікрофібра трьох фракцій. Всі компоненти суміші: наповнювачі, гіпсове в'язуче з фосфогіпсу, органічні добавки виготовлялися у вигляді сухих будівельних сумішей, для полегшення дорожньо-будівельних робіт. **Висновки.** Проведено порівняння економічної ефективності техногенного фосфогіпсу та будівельного гіпсу. Застосування нових «полегшених» технологій забезпечує багаторазове скорочення часу термічної обробки та високу дисперсність гіпсового в'язучого з фосфогіпсу. Встановлено раціональність спільної обробки фосфогіпсу з кварцовим піском або вапняком-черепашником. Досліджено вплив просторово-тимчасових, нелінійних процесів на основні показники якості. Так, в результаті диспергування величина питомої поверхні збільшується з  $S_{\text{пит.}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$  до  $400 \text{ м}^2/\text{кг}$  при однаковій тривалості обробки в межах 8-10 хв, що забезпечує підвищення  $F_{\text{ст}}$  з 3,5 до 5,0 МПа,  $F_{\text{виг.}}$  – з 0,1 до 1,0 МПа. Досліджено та проаналізовано закономірності впливу на не структурно-реологічні властивості суміші та фізико-механічні властивості затверділих матеріалів компонентних, органічних та полідисперсних неорганічних добавок-наповнювачів. З використанням ЕС моделювання проведено порівняльний аналіз взаємовпливу сумісності всіх компонентів між собою. Як варіюванні фактори використано карбонатну добавку Sika, гідрофобізатор Wait, метакаолін і тривимірну воластонітову фібру. Досліджено основні властивості: водопотребу, терміни тужавлення, міцність при стиску, опір розтягу при згині, водо- та тріщиностійкість. У результаті проведених досліджень запропоновано склади у вигляді сухих будівельних сумішей для основ дорожнього полотна автомобільних доріг.

**Ключові слова:** техногенна сировина; фосфогіпс; сухі будівельні суміші; дорожнє полотно; основа доріг; органічні добавки; мінеральні наповнювачі

## EFFECTIVE USE OF PHOSPHOGYPSUM IN THE CONSTRUCTION OF MOTORWAYS

SHYNKEVYCH O.I.<sup>1</sup>, Postgrad. Stud.,  
SMOLIN D.O.<sup>2\*</sup>, Postgrad. Stud.

<sup>1</sup> Department of Automobile Roads and Airfields, Odes'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4-a, Didrikhson St., Odesa, 65004, Ukraine, tel. +38 (0939) 79-99-22, e-mail: elena\_shinkevich@ukr.net, ORCID ID: 0009-0006-2906-4958

<sup>2\*</sup> Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: smolin.d.a@i.ua, ORCID ID: 0009-0007-0586-1861

**Abstract. Articulation of issue.** The accumulation of man-made waste is rightly considered one of the main sources of pollution of the biosphere, but it is reasonable to view this problem as a source of additional resources for obtaining a wide range of building materials for various purposes. This approach is not only rational but also necessary, as it contributes to the conservation of natural resources and economic security not only for humans but also for flora and fauna. In this situation, the issue of not only recycling, processing and using them, but also increasing the volume of man-made raw materials in the total volume of building mixtures, taking into account sanitary and production services and human life safety, is relevant for modern society. One possible option could be the development and implementation of dense coatings for dumps, but this approach does not contribute to the release of fertile land. In many developed countries around the world, roads are being built using phosphogypsum. Currently, the environmental safety and economic efficiency of phosphogypsum roads, which significantly reduce the cost of road construction, are highly valued. However, further research and development is needed to develop the prospects of the road construction industry. **The purpose of this article** is to improve the operational and construction properties of road concrete made from man-made raw materials in the form of gypsum binder from phosphogypsum, modified with a complex of multifunctional organic additives and polydisperse mineral fillers. At the first stage, a complex of multifunctional organic additives was selected and justified, in particular a carboxylate hydrophobic additive. Quartz sand, better known as shell rock, and volastonite microfibres of three fractions were used as a complex of polydisperse mineral fillers. The mixture: fillers, gypsum binder from phosphogypsum, organic additives were manufactured in the form of dry construction mixtures to facilitate road construction works. **Conclusions.** A comparison of the economic efficiency of technogenic phosphogypsum and building gypsum was carried out. The use of new 'lightweight' technologies provides a significant reduction in heat treatment time and high dispersibility of gypsum binder from phosphogypsum. The rationality of joint processing of phosphogypsum with quartz sand or shell limestone has been established. The influence of spatial-temporal nonlinear processes on key quality indicators has been investigated. Thus, as a result of dispersion, the specific surface area increases from  $S_{yg} = 300 \text{ m}^2/\text{kg}$  to  $400 \text{ m}^2/\text{kg}$  with the same processing time within 8–10 minutes, which provides an increase in  $F_{st}$  from 3.5 to 5.0 MPa,  $F_{izg}$  – from 0.1 to 1.0 MPa. The patterns of influence on the structural and rheological properties of the mixture and the physical and mechanical properties of hardened materials of component, organic and polydisperse inorganic additives-fillers were studied and analysed. Using EC modelling, a comparative analysis of the mutual influence of the compatibility of all components with each other was carried out. The following factors were varied: Sika carbonate additive, Wait water repellent, metakaolin and three-dimensional wollastonite fibre. The main properties were studied: water demand, setting time, compressive strength, flexural tensile strength, water and crack resistance. As a result of the research, compositions in the form of S.S.S. for the bases of motorway roadbeds were proposed.

**Keywords:** *technogenic raw materials; phosphogypsum; dry building mixtures; roadbed; road base; organic additives; mineral fillers*

**Постановка проблеми.** Сучасне будівництво доріг перебуває на стадії трансформації, спричиненої зростанням вартості та кількості автомобільного транспорту, а також посиленням екологічних регламентів (ІМО, MARPOL, EEDI/EEEXI). У цьому контексті багатокомпонентні суміші, що поєднують штучні та техногенні компоненти, стають ключовим інструментом для зменшення фінансових, екологічних та економічних витрат. В Україні набуває чинності нова нормативна база, що суттєво підвищує вимоги до енергоефективності в будівельній галузі. Зокрема, ДБН В.1.2-11:2021 «Енергозбереження та енергоефективність». Порівняльний аналіз штучних та техногенних систем показує

суттєві переваги комбінованого підходу. При цьому потрібно, щоб була збільшена кількість техногенних оброблених компонентів у дорожніх шарах. Наразі одним із важливих показників якості дорожнього полотна є довговічність. На довговічність дорожніх бетонів основний вплив має нерациональне використання добавок, порушення технологій приготування, транспортування та укладання бетонної суміші, а також посилення агресивної дії сучасних протипожежних реагентів. Недостатньо враховано комплексний вплив різних добавок на структуру дорожніх бетонів.

**Мета дослідження** – поліпшення експлуатаційних властивостей основи

дорожнього полотна з фосфогіпсу, модифікованого комплексом поліфункціональних органічних добавок і полідисперсних армуючих мінеральних наповнювачів.

#### **Аналіз досліджень та публікацій.**

Існуючі теоретичні уявлення про характер морозного впливу потребують уточнення. Сучасні технології бетонів дозволяють змінювати властивості бетонних сумішей і самих бетонів у широких межах. Для цього використовують комплекси хімічних добавок, тонкоподрібнених наповнювачів, фібри різного походження [1; 2; 15]. Застосування фібри, зокрема поліпропіленової, призводить до зниження міцності бетону при стиску до 25 %. Встановлено, що основним позитивним ефектом дії суперпластифікуючих добавок є зниження водоспоживання, що сприяє ущільненню та зміцненню структури бетону. Однак припущення вчених щодо формування в бетонах із суперпластифікаторами умовно замкнутої мікропористої структури неоднозначні й потребують уточнення [2; 11]. Наведено узагальнену класифікацію мінеральних добавок [4] і показано, що основними ефектами їх дії можуть бути ущільнення мікро- та мезаструктури бетону (добавки, наповнювачі), зв'язування вільної вологи і зниження пористості, кальматації пор і дефектів під впливом хімічно активних добавок [2; 5; 6; 8; 11]. Дослідження (Дворкина Л. І., Вирового В. М., Руновой Р. Ф., Кривенка П. В., Пушкаревой К. К., Ольгинского О. Г.) та застосування мікронаповнювачів сприяє зміні характеру мікропористості затверділого бетону з утворенням дрібних і замкнутих пор підвищенню міцності водо- та корозійній стійкості бетону. Дослідження [2; 6; 8; 9; 11–13] та застосування мікронаповнювачів сприяють зміні характеру мікропористості затверділого бетону з утворенням дрібних і замкнутих пор, підвищенню міцності, водо- та корозійній стійкості бетону. Також важливо те, що наповнювачі знижують об'ємні деформації. При цьому важливу роль

відіграють дисперсність та активність поверхні мікронаповнювача. Також розглянуто досвід застосування різних видів фібри в дорожніх бетонах. Показано, що різні види фібри, зокрема сталева, поліпропіленова, вуглецева, поліамідна, можуть підвищувати деформативні властивості бетонів, що особливо важливо для підвищення довготривалої міцності та тріщиностійкості дорожніх бетонів [1; 6; 7; 12]. Найбільш технологічною для застосування в бетонах є поліпропіленова фібра. Однак досвід застосування поліпропіленової фібри в дорожніх бетонах недостатній [1; 2; 11; 17–19]. Використання відходів різних виробництв є досить важливим шляхом економії матеріальних і енергетичних ресурсів у виробництві дорожніх бетонів. Серед цих відходів важливе місце займають відходи різних підприємств, зокрема відходи фосфогіпсу. Збільшення кількості відходів призводить до утворення відвалів, які займають значні площі чорнозему та сільськогосподарських угідь. Разом із тим раціонально використовувати комплексні в'язкі матеріали, які є техногенним сировинами і відрізняються зниженими економічними показниками. У зв'язку з цим розробка ефективних високоякісних будівельно-дорожніх бетонів, модифікованих комплексами поліфункціональних сумісних між собою органічних добавок та полідисперсних армувальних наповнювачів, є актуальним завданням. Врахування основних вимог до різних добавок, сумісність складових між собою, застосування на ринку України технічного і економічного обґрунтування дозволить підвищити ефективність в'язучих різного виду та бетонів на їх основі. Обсяги й ефективність різних видів добавок постійно зростають, якість і склади добавок постійно вдосконалюються, розширюється їх номенклатура. Для отримання необхідних показників якості та впливу добавок необхідний аналіз їх впливу із застосуванням ЕС-моделювання рецептурно-технологічних рішень удосконалення композиційних в'язучих і матеріалів на їх основі, що

забезпечує поліпшення властивостей дорожнього полотна в цілому, включаючи основний несучий шар. Значну роль у формуванні та поліпшенні якості дорожнього полотна відіграє потенціална активація різного виду. Розв'язання екологічних і економічних проблем України пов'язане із застосуванням відходів виробництв, у тому числі від виробництва сільськогосподарських добрив. У даній ситуації особливо важливу роль відіграє активація інертної складової відходів для забезпечення максимальної ступені їх утилізації та створення передумов для отримання якісного будівельного матеріалу [16–20]. Перспективним рішенням вдосконалення фізико-механічних властивостей композиційних в'язучих і сумішей на їх основі є різні види активації [17-19]. Механоактивація, сумісність з хімічною та іншими видами активації залишається одним з найбільш різноманітних і енергоефективних способів підвищення якості сумішей і матеріалів їх потенційних можливостей [13-15] також сприяє прискоренню процесів затвердіння, підвищенню ступеня гідратації в'язучого, поліпшенню основних властивостей матеріалів, які істотно змінюються в часі і просторі [1; 20]. Не менш важливим є використання тонкодисперсних армуючих волокон. Волокна істотно знижують можливі деформаційні процеси в матеріалах. Раніше традиційне будівництво автомобільних доріг в Україні базувалося на значних витратах енергії, матеріалів і часу. Вартість привезених матеріалів, зокрема, щебеню і кварцового піску, та їх транспортування істотно впливають на загальну вартість дорожнього полотна. Питання забезпечення галузі дорожно-будівельних матеріалів вирішуються шляхом використання кондиційних, вже перероблених матеріалів: місцевих ґрунтів для шарів дорожніх покриттів, композиційних в'язучих на основі техногенної сировини, зокрема, золошлаків, шлаків, гіпсового в'язучого з фосфогіпсів та інших відходів різних виробництв. Аналіз світового та вітчизняного досвіду дозволяє припустити, що оптимальним рішенням цієї

проблеми може бути використання фосфогіпсу, модифікованого поліфункціональними органічними добавками, армованих полідисперсними мінеральними наповнювачами і високою дисперсністю гіпсового в'язучого за рахунок ефективної обробки сировини з фосфогіпсу, яка забезпечується в процесі різного виду активацій

**Результати досліджень.** Гіпсове в'язуче з фосфогіпсу - це матеріал, для якого раціонально використовувати широкий спектр добавок, що надають йому спеціальні технологічні та експлуатаційні властивості. Використання органічних комплексних поліфункціональних і полідисперсних мінеральних добавок-наповнювачів різного призначення дозволяє забезпечити необхідні властивості основам дорожнього полотна. У роботі проведено підбір складу сухої будівельної суміші (СБС) для основи доріг. Основа дороги спільно з покриттям перерозподіляє та знижує тиск на розташовані нижче додаткові шари земляного полотна. Основи повинні добре чинити опір розтягу при згині та мати необхідну міцність на стиск, бути монолітними й зсувостійкими. Важливими також є такі показники, як водопотреба, водостійкість, строки твердіння, міцність при стиску та згині. Проведено загальний аналіз впливу основних компонентів складу СБС на перелічені властивості. Дослідження властивостей проводилися із застосуванням математичного моделювання зі статистичною обробкою отриманих даних та аналізом нелінійного взаємовпливу компонентів сумішей між собою. За експериментальними даними було розроблено відповідні експериментально-статистичні (ЕС) моделі, за якими були побудовані однофакторні діаграми. Діаграми відображають нелінійний вплив варійованих факторів у зонах максимальних і мінімальних значень показників якості. Побудовані однофакторні діаграми описують зміну властивостей фосфогіпсового в'язучого під впливом карбоксилатної добавки, гідрофобізатора та дисперсних наповнювачів різного

призначення. Зокрема діаграми (рис. 1) описують вплив досліджуваних факторів на водопотребу.

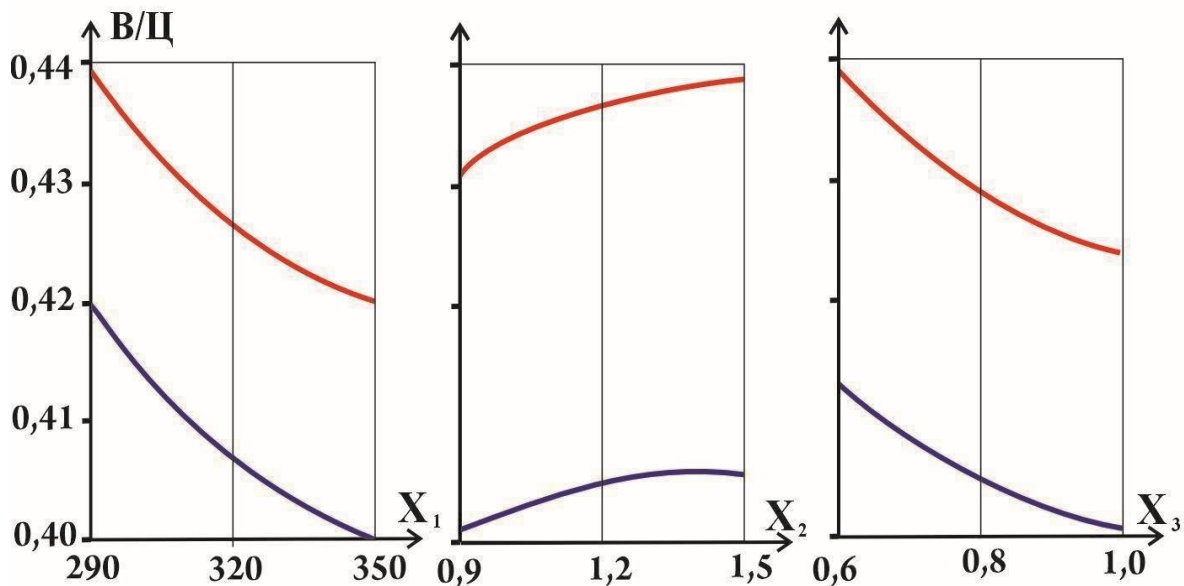


Рис. 1. Вплив варійованих факторів на В/Ц сумішей рівної рухомості в зонах мінімальних та максимальних значень

Аналіз рисунку 1 а, б показує, що всі варійовані фактори нелінійно впливають на В/Г відношення. Водопотреба будівельного гіпсу коливається в межах від 0,40 до 0,70. Застосування суперпластифікатора суттєво змінює водовміст, який може змінюватися від 0,85 до 0,50. Збільшення кількості суперпластифікатора Melflux 2651 F, який застосовується як розчинник і протиусадковий компонент для СБС, дозволяє знизити В/Г співвідношення з 0,80 до 0,50 при його вмісті (0,1–1,0 %) з покращенням технологічних властивостей фосфогіпсової суміші. При варіюванні кількості волластоніту в межах факторного простору експерименту показники В/Г сумішей змінюються значно менше – від 0,6 до 0,45 (максимум). Введення в суміш метакаоліну (МК) у кількості від 5 до 10 % від маси також знижує водовміст, а в інтервалі від 10 до 15 % метакаолін (МК) підвищує водопотребу фосфогіпсового в'язучого до 0,6–0,65. Волластоніт незначно впливає на водопотребу. За результатами експериментів встановлено, що застосування наповнювачів МК скорочує термін

тужавлення залежно від водогіпсового співвідношення. Термін початку тужавлення КФГВ знаходиться в межах: при вмісті Melflux 0,6 % - 10–25 хв., при вмісті Melflux 1,1 % - 30–35 хв.

Відповідно до ДСТУ для дорожніх не жорстких бетонів норми  $F_{cm} = 7-9$  та  $F_{ctsm} = 1.5-3.0$ . Із діаграм на (рис. 2) (а, б) випливає, що максимальне значення міцності при стиску дорівнює 12–14 МПа. Такі показники досягаються при використанні суперпластифікатора Melflux 2651 F у кількості 0,6–0,7 %. На розтяг при згині максимальні значення підвищуються з 0,4 до 0,6 МПа при вмісті Melflux у кількості 0,60–0,70 %. Гідрофобізатор White нового покоління також позитивно впливає на показники  $F_{cm}$  та  $F_{ctsm}$ : показники якості збільшуються на 3,5–5 %. Слід зазначити, що міцність на розтяг при згині більшості складів перевищує вимоги у 1,2–1,8 рази. Армуючі волокна волластоніту також вводяться в суміш для поліпшення деформативних характеристик СБС на розтяг при згині та до 0,38 МПа тріщиностійкості.

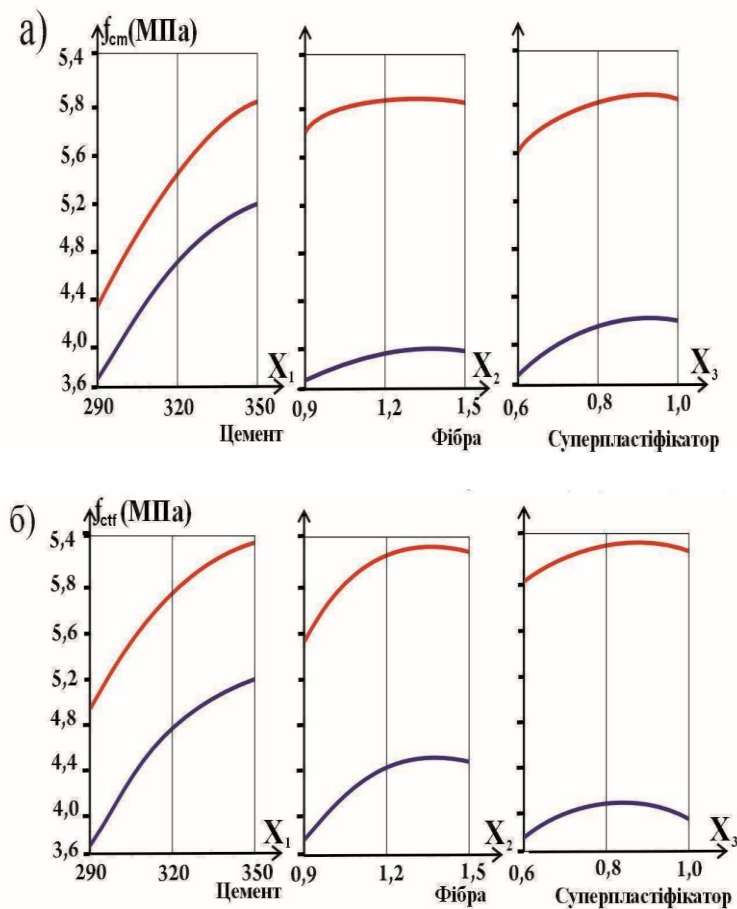


Рис. 2. Вплив варійованих факторів на міцність фібробетонів на стиск (а) і на розтяг при згині (б) в зонах мінімальних і максимальних значень

Визначення показників якості проводилося відповідно до ДСТУ Б В.2.7-42-97 «Методи визначення водопоглинання, щільності та морозостійкості будівельних матеріалів і виробів та ін.» [31]. Найбільші

значення  $F_{ctsm}$  отримані при вмісті гідрофобізатора White у кількості 2 %. Склади, які мають максимальну водостійкість, характеризуються коефіцієнтом  $K_p = 0,80-0,85$  (рис. 3).

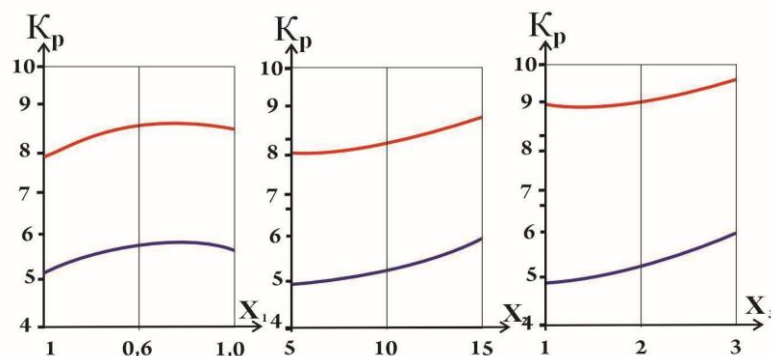


Рис. 3. Вплив варійованих факторів на водостійкість модифікованого фосфогіпсу в зонах максимуму та мінімуму

Та показниками  $F_{ct} = 10-12,5$  МПа,  $F_{ctm} = 4-6$  МПа, що відповідає стандартним вимогам. При цьому слід зазначити, що співвідношення компонентів та їх роль у формуванні структури і властивостей

змінюється, тому необхідні подальші експерименти та дослідження.

**Висновки і перспектива подальших досліджень.** Виконано аналіз технологій утилізації фосфогіпсу з переробленням його

в будівельний гіпс. Показано високу енергомісткість відомих технологій. Визначено проблеми, які необхідно вирішити для зниження подальшого забруднення навколишнього середовища в районах складування фосфогіпсових відходів. Утилізація відходів хімічного виробництва має важливе значення, оскільки розширює виробничу базу та здешевлює будівництво, а також позитивно впливає на охорону навколишнього природного середовища. Існуючі резерви техногенного фосфогіпсу, обсяг яких перевищує 60 тис. тон, дають можливість значно розширити сфери його використання. Установлено, що підвищення температури та тривалості помелу фосфогіпсу в імпрегнаційній камері скорочує тривалість обробки процесів: температуру – на порядок, а величина питомої поверхні фосфогіпсу при цьому збільшується у 2–2,5 рази. Міцність на стиск відповідає вимогам ДСТУ і становить від 7 до 9 МПа, а через 1,5 години складає 11–12 МПа. Термін тужавіння залежить від виду органічних і мінеральних добавок.

Початок тужавіння в'язучих, отриманих із фосфогіпсу з введенням комплексу органічних і мінеральних добавок, настає через 30–46 хвилин, а без добавок – через 15–18 хвилин. На істотне подовження строків тужавіння впливає карбоксилатна добавка Sika. Комплекс мінеральних добавок, зокрема армувальні волокнисті компоненти, сприяють підвищенню міцності при стиску та розтягу, зростанню тріщиностійкості й водостійкості матеріалу. При цьому збільшується середня густина ( $450 \text{ кг/м}^3$ ). Водопотреба зменшується з 0,55 до 0,45 внаслідок збільшення вмісту полікарбоксилатної добавки з 0,1 до 1,1 %. Найбільш перспективним напрямом підвищення екологічної безпеки та економічної доцільності перероблення фосфогіпсу у в'язуче є нейтралізація домішок у фосфогіпсі без додавання води. Цей процес реалізується у вигляді СБС. Дані щодо отримання гіпсових в'язучих зі свіжого та лежалого фосфогіпсу, на даний час в науковій літературі відсутні [13–18].

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини : підруч. Київ : Основа, 2012. 448 с.
2. Пашенко О. О. В'язучі матеріали : підруч. Київ : Вища школа, 1995. 416 с.
3. Naoum M. C., Sapidis G. M., Papadopoulos N. A., Voutetaki M. E. An Electromechanical Impedance-Based Application of Realtime Monitoring for the Load-Induced Flexural Stress and Damage in Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2023. № 11 (4). P. 34.
4. Flores Nicolás A., Menchaca Campos E. C., Flores Nicolás M., Martínez González J. J., González Noriega O. A., Uruchurtu Chavarín J. Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete. *Fibers*. 2024. № 12 (3). P. 24.
5. Benzerara M., Biskri Y., Saidani M., Slimani F., Belouettar R. High-Temperature Behavior of Polyethylene-Terephthalate-Fiber-Reinforced Sand Concrete : Experimental Investigation. *Fibers*. 2023. № 11 (5). P. 46.
6. Geremew A., Outtier A., De Winne P., Demissie T. A., De Backer H. An Experimental Investigation on the Effect of Incorporating Natural Fibers on the Mechanical and Durability Properties of Concrete by Using Treated Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Application. *Fibers*. 2025. № 13 (3). P. 26.
7. Poudel S., Cibelli A., Del Prete C., Wan-Wendner R., Mazzotti C., Buratti N. Insights on Lattice Discrete Particle Model Calibration and Validation Procedure to Simulate Polypropylene and Steel Fibre-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2025. № 13 (2). P. 16.
8. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H., Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019. Vol. 13, № 4. Pp. 495–502.
9. Sanytsky M., Ushero-Marshak A., Kropyvnytska T., Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite and limestone. *Cement Wapno Beton*. 2020. № 25 (5). Pp. 416–427.
10. Plank J. Concrete Admixtures Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? 19'Ibaasil. Weimar. 2015. PV03. P. 18.
11. Roy D., Daimon M. Effect of Admixtures upon Electrokinetic phenomena during hydration of  $C_3S$ .  $C_3A$  and port-land cement. *Cements*. 1980. Vol. II. Pp. 242–246.
12. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Хасан Є. Г., Константиновський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство : підруч.; за ред. П. В. Кривенко. Київ : Ліра-К, 2015. 624 с.

13. Пушкарьова К. К., Кочевих М. О. Матеріалознавство для архітекторів та дизайнерів : навч. посіб. Київ : Вид-во Ліра-К, 2019. 424 с.
14. Kondofesky-Mintova L., Plank J. *Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference* (October 2012, Prague, Czech Republic). P. 423.
15. Sanytskyi M. A., Kondratieva N. V. *Modern Trends in the Development and Production of Silicate Materials : III All-Ukrainian Science and Technology Conference* (September 5–8, 2016, Lviv). 2016. P. 93.
16. Фізика і хімія поверхності. Кн. 1. За ред. М. Т. Картеля та В. В. Лобанова. Київ : Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйко НАН України – Інтерсервіс, 2015. 1085 с.
17. Shishkin A., Shishkina A., Vatin N. Low-shrinkage alcohol cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. 2014. Pp. 917–921.
18. Shishkina A., Shishkin A. Study of the effect of micellar catalysis on the strength of alkaline reactive powder concrete. *EEJET*. 2018. № 3/6 (93). Pp. 46–51.

## REFERENCES

1. Runova R.F., Dvorkin L.J., Dvorkin O.L. and Nosovs'kij Yu.L. *V'yazhuchi rehovini [Binders]*. Kyiv : Osnova Publ., 2012, 448 p. (in Ukrainian).
2. Pashchenko O.O. *V'yazhuchi materialy [Binding materials]*. Kyiv : Vishcha Shkola Publ., 1995, 416 p. (in Ukrainian).
3. Naoum M.C., Sapidis G.M., Papadopoulos N.A. and Voutetaki M.E. An Electromechanical Impedance-Based Application of Realtime Monitoring for the Load-Induced Flexural Stress and Damage in Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2023, no. 11 (4), p. 34.
4. Flores Nicolás A., Menchaca Campos E.C., Flores Nicolás M., Martínez González J.J., González Noriega O. A. and Uruchurtu Chavarín J. Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete. *Fibers*. 2024, no. 12 (3), p. 24.
5. Benzerara M., Biskri Y., Saidani M., Slimani F. and Belouettar R. High-Temperature Behavior of Polyethylene-Terephthalate-Fiber-Reinforced Sand Concrete : Experimental Investigation. *Fibers*. 2023, no. 11 (5), p. 46.
6. Geremew A., Outtier A., De Winne P., Demissie T.A. and De Backer H. An Experimental Investigation on the Effect of Incorporating Natural Fibers on the Mechanical and Durability Properties of Concrete by Using Treated Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Application. *Fibers*, 2025, no. 13 (3), p. 26.
7. Poudel S., Cibelli A., Del Prete C., Wan-Wendner R., Mazzotti C. and Buratti N. Insights on Lattice Discrete Particle Model Calibration and Validation Procedure to Simulate Polypropylene and Steel Fibre-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2025, no. 13 (2), p. 16.
8. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H. and Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019, vol. 13, no. 4, pp. 495–502.
9. Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T. and Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite and limestone. *Cement Wapno Beton*. 2020, no. 25 (5), pp. 416–427.
10. Plank J. Concrete Admixtures Where Are We Now and What Can We Expect in the Future? 19<sup>th</sup> Ibaasil. Weimar. 2015, PV03, p. 18.
11. Roy D. and Daimon M. Effect of Admixtures upon Electrokinetic phenomena during hydration of C<sub>3</sub>S. C<sub>3</sub>A and portland cement. *Cements*. 1980, vol. II, pp. 242–246.
12. Kryvenko P.V., Pushkariova K.K., Baranovskyi V.B., Kochevyh M.O., Hasan Ye.G., Konstantynivskyi B.Ya. and Raksha V.O. *Budivel'ne Materialoznavstvo : pidruchnik [Materials Science in Construction : textbook]*. Ed. by P.V. Kryvenko. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p. (in Ukrainian).
13. Pushkariova K.K. and Kochevykh M.O. *Materialoznavstvo dlya Arhitektoriv ta Dizayneriv : navchal'nyy posibnyk [Materials Science for Architects and Designers : textbook]*. Kyiv : Lira-K Publ., 2018, 424 p. (in Ukrainian).
14. Kondofesky-Mintova L. and Plank J. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference. October 2012, Prague, Czech Republic, p.423.
15. Sanytskyi M.A. and Kondratieva N.V. Modern Trends in the Development and Production of Silicate Materials : III All-Ukrainian Science and Technology Conference. September 5–8, 2016, Lviv, p. 93.
16. *Fizika i Khimiya Poverkhnosti. Kniga I. Fizika Poverkhnosti [Surface Physics and Chemistry. Book I. Surface Physics* (Eds. M.T. Kartel and V.V. Lobanov)]. Kyiv : O.O. Chuiko Institute of Surface Chemistry of the N.A.S. of Ukraine-Interservis LLC, 2015, 1085 p. (in Ukrainian).
17. Shishkin A., Shishkina A. and Vatin N. Low-shrinkage alcohol cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 633–634, 2014, pp. 917–921.
18. Shishkina A. and Shishkin A. Study of the effect of micellar catalysis on the strength of alkaline reactive powder concrete. *EEJET*. 2018, no. 3/6 (93), pp. 46–51.

Надійшла до редакції: 15.02.2026.