

## ВПЛИВ ДОДАТКОВОГО ВВЕДЕННЯ $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ НА ПОКАЗНИКИ КИСЛОТОСТІЙКОСТІ ГІБРИДНИХ ЛУЖНИХ ЦЕМЕНТІВ

Вікторія ЗОЗУЛІНЕЦЬ<sup>1</sup>, Олександр КОВАЛЬЧУК<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Науково-дослідний інститут в'язучих речовин та матеріалів ім. В.Д. Глуховського

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup>zozulnets555@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8066-2033>

<sup>2</sup>kovalchuk.oyu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6337-0488>

**Анотація.** Дана робота присвячена дослідженню безпосереднього впливу фос-фатної солі, на прикладі тринатрій фосфату ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), на показник кислотостійкості гібридних лужноактивованих цементів. Адже з кожним днем кислотостійкість стає все більш важливою властивістю для цементних матеріалів через широкий спектр застосувань, де вони піддаються впливу агресивних кислотних середовищ, особливо це стосується об'єктів хімічної та харчової промисловості. Окрім вищенаведених до них належать каналізаційні системи, сільськогосподарське середовище, нафтові свердловини, кислотні опади та багато іншого.

Відомо, що звичайні в'язучі на основі портландцементу чутливі до кислотного впливу через хімічну природу їх основних гідратованих фаз. В'язучі, активовані лугом, є альтернативою традиційному портландцементу і характеризуються цілою низкою спеціальних властивостей, особливо за умови проведення відповідних модифікацій компонентних складів даних цементів. Однією з основних властивостей, характерних для лужно-активованих в'язучих речовин, є їх стійкість до впливу агресивних середовищ.

На основі літературного аналізу та беручи до уваги вітчизняні та світові надбання в даному напрямку, було розроблено ряд модельних систем на основі доменного гранульованого шлаку та лужного компонента з використанням фосфатної солі з різним її відсотковим вмістом. Таким чином, об'єктом дослідження є шлаколужна система «доменний гранульований шлак – лужний компонент (пре-дставлений метасилікатом натрію п'ятиводним) – тринатрій фосфат». В ході



**Вікторія ЗОЗУЛІНЕЦЬ**

здобувач вищої освіти рівня PhD,  
по кафедрі технології  
будівельних конструкцій та  
виробів,  
М.Н.С



**Олександр КОВАЛЬЧУК**

Проректор з наукової роботи та  
інноваційного розвитку,  
К.Т.Н., С.Н.С

досліджень було здійснено визначення основних фізико-механічних характеристик розроблених складів та проведено аналіз результатів. Визначення показника кислотостійкості ( $K_c \geq 0,8$ ) підтвердило доцільність застосування  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  при виготовленні кислотостійких лужно-активованих цементів.

**Ключові слова.** Лужноактивовані в'язучі речовини; кислотостійкість; фосфатні зв'язки; нормальні умови; експлуатаційне середовище; тринатрій фосфат.

### ВСТУП

Довговічність будівельних матеріалів є однією з найголовніших вимог сучасного промислового виробництва, з огляду на постійно зростаюче використання ресурсів, що призводить до забруднення навколишнього середовища.

Однією із найпоширеніших причин руйнування матеріалів є наявність в експлуатаційному середовищі кислот та їх залишків, внаслідок чого у будівельному матеріалознавстві були розроблені кислотостійкі цементи [1-3]. Проте довговічність штучного каменю на їх основі сильно залежить від експлуатаційного середовища, і при зміні рН на нейтральне, чи лужне – розчинність новоутворень зростає, що призводить до руйнування каменю. Довговічність матеріалів на основі лужних в'язучих систем доведена досвідом НДІВМ ім. В.Д. Глуховського, а також іншими науковими школами, що підтверджують стійкість штучного каменю у різних агресивних експлуатаційних середовищах [4-6]. Проте для промислового використання кислото-стійких лужних в'язучих речовин існує необхідність проведення досліджень у напрямку розробки спеціальних цементів з забезпеченням їх технологічних та експлуатаційних властивостей, залежно від умов структуроутворення та характеристик середовища експлуатації.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Як відомо, цементні матеріали мають лужну природу. Однак за рахунок цього вони схильні до реакції нейтралізації кислотами, що призводить до руйнування структури затверділого каменю [7,8]. Непридатність використання традиційних будівельних матеріалів для експлуатації в середовищі з низьким рН та складність роботи з існуючими кислотостійкими цементами обумовлює актуальність розробки нового виду кислотостійких матеріалів. Стійкість до впливу агресивних середовищ є однією з основних властивостей, характерних для лужних цементів, що виокремлює їх з ряду традиційних в'язучих речовин. Тому саме їх модифікація хімічними та мінеральними добавками різного походження є доцільною при розробці кислотостійких цементів нового покоління [9-11].

Попередні дослідження базувались на зниженні основності гідросилікатів, що формуються в процесі структуроутворення

штучного каменю [12-14]. А дане – на вивченні ролі аніону на процес отримання кислотостійкого матеріалу в результаті формування фосфатних зв'язків. Це певна аналогія з традиційними кислотостійкими в'язучими, але у даному випадку дослідження проводилися на шлаколуужних системах з додавання фосфатної солі ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) у кількості 2, 4 та 6%. Об'єктом дослідження є шлаколуужна система «доменний гранульований шлак – лужний компонент –  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ».

## МЕТА І МЕТОДИ

**Метою роботи** є розробка кислото-стійких матеріалів на основі гібридних лужних цементів в системі  $\text{R}_2\text{O} - \text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  підвищеної непро-никності та зменшеної відкритої пористості для застосування у виробках і конструкціях загальнобудівельного та спеціального призначення.

**Об'єкт дослідження** – матеріали на основі гібридних лужних цементів, які в процесі експлуатації піддаються впливу дії агресивних (кислотних) середовищ.

**Предметом розробки** є процеси направлено-го структуроутворення штучного каменю на основі гібридних лужних цементів, а також формування його мікро- та макро-структури, з метою підвищення корозійної стійкості та довговічності.

### Задачі дослідження:

- дослідження фізико-хімічних умов синтезу кислотостійких фаз на основі лужної в'язучої речовини;
- отримання оптимальних складів кислотостійких лужних цементів і виявлення механізму управління процесом структуроутворення штучного каменю на мікро- і макрорівнях в напрямку підвищення ступеню його кислотостійкості;
- вивчення впливу модифікаторів різної природи, виду кислотного середовища, а також технологічних параметрів на особливості процесу тверднення та основні фізико-механічні властивості оптимальних складів кислотостійких лужних цементів;

- безпосереднє вивчення основних фізико-механічних характеристики розроблених складів кислотостійких лужних цементів в напрямку забезпечення збереження їх властивостей протягом часу експлуатації

**Методи досліджень.** Вивчення особливостей процесів структуроутворення лужних цементів проводили із застосуванням комплексу фізико-механічних та фізико-хімічних методів досліджень на зразках розмірами 20x20 та 40x40 мм.

Фізико-механічні випробування лужного цементу проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-185:2009, ДСТУ Б В.2.7-187:2009, ДСТУ Б В.2.7-188:2009, які охоплювали визначення нормальної густоти цементного тіста, строки тужавлення, границі міцності на стиск та згин цементного каменю та тонкості помелу цементу.

Питому поверхню вихідних подрібнених сировинних компонентів і готових цементів визначали за допомогою приладу Блейна.

Кислотостійкість матеріалу оцінювали:

- за експрес-методом шляхом кип'ятіння зразків з цементного тіста протягом 1 години у 35% розчині сірчаної кислоти ( $H_2SO_4$ ). Як критерії оцінки було обрано показники зовнішнього вигляду, втрати маси після випробування та залишкову міцність після випробування.
- шляхом витримування зразків з цементно-піщаного розчину (співвідношення 1:3) у 5% розчині сірчаної кислоти ( $H_2SO_4$ ) протягом 30 діб, після попереднього набору ними міцності протягом 28 діб в н.у. Критерії оцінки складали зовнішній вигляд, залишкова міцність після випробування та деформації усадки/розширення.

**Сировина.** Як основний алюмосилікатний компонент лужного цементу було використано гранульований доменний шлак виробництва ПАТ «ДМЗ», м. Кам'янське (Україна), згідно з ДСТУ Б.В.2.7-302:2014 розмелений до питомої поверхні  $S_{пит} = 430 \text{ м}^2/\text{кг}$  за Блейном та модулем основності  $M_o = 1,11$ . Як джерело додаткової алюмо-силікатної складової використовували дегідратований каолін Глуховецького родо-вища

( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) з питомою поверхнею  $S_{пит} = 1800 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

В якості лужного компоненту було використано метасилікат натрію п'яти-водний  $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$  згідно з ТУ 2145-5225. Лужний компонент використовували в сухому порошкоподібному стані.

В якості фосфатної солі для модифікації цементу використано тринатрій фосфат,  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ , згідно з CAS 7601-54-9

Для приготування розчинів агресивного середовища було використано розчини сірчаної кислоти ( $H_2SO_4$ ) 2-х концентрацій: 5% та 35%. Істинна густина  $H_2SO_4$  складає  $1,27 \text{ г}/\text{см}^3$ .

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати дослідження компонентних складів підтверджують, що відсотковий вміст  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  прямопропорційно впливає на показник тіста нормальної густини (ТНГ) та терміни тужавлення системи. Зі збільшенням кількості солі показник ТНГ зменшується, а терміни тужавлення, навпаки збільшуються, що також має позитивний вплив на структуро-утворення цементного каменю.

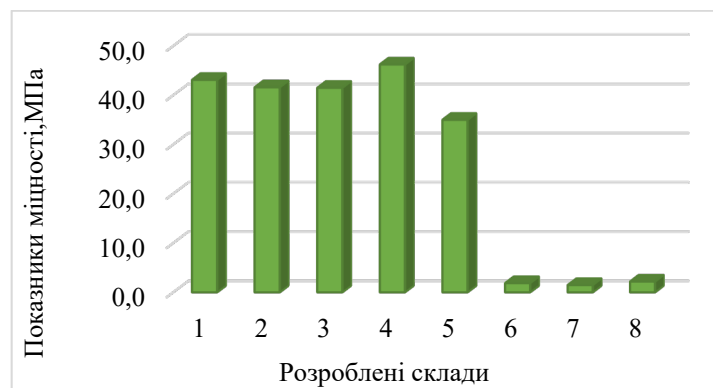
За наявності в системі 6%  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ , показник ТНГ складає 18,5%, а терміни тужавлення характеризуються параметрами: початок тужавлення – 75 хв, кінець – 95 хв. Для порівняння, контрольний склад (без додавання  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ ) має більшу водопотребу (ТНГ – 22,0%), а початок та кінець тужавлення складає 30 хв та 50 хв відповідно. Результати проведених досліджень наведені в табл.1.

Також прослідковується незначний вплив введення ТНФ до 6% на показники міцності в системі «шлак – лужний компонент –  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ ». Тоді як взаємодія з метакаоліном в системі «шлак – лужний компонент – метакаолін –  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ » призводить до значної втрати міцності на 28 добу тверднення. Навіть при введенні фосфатної солі у кількості 2% міцність на стиск складає менше 5 МПа (рис. 1)..

**Табл. 1.** Результати дослідження тіста нормальної густини та строків тужавлення кислотостійких лужних цементів з використанням  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

**Table 1.** The results of the study of the dough of normal density and the hardening periods of acid-resistant alkaline cements using  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

№	Вміст компонентів, %				Тісто нормальної густини, %	Терміни тужавлення, хв	
	мета-силікат	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	мета-каолін	шлак		початок	кінець
1	10	0	0	90	22,0	30	50
2	10	2	0	88	20,5	60	80
3	10	4	0	86	19,5	70	90
4	10	6	0	84	18,5	75	95
5	10	0	10	80	25,5	45	85
6	10	2	10	78	25,0	60	100
7	10	4	10	86	24,5	65	110
8	10	6	10	84	23,5	70	115



**Рис.1.** Показники міцності при стиску кислото-стійких лужних цементів на 28 добу тверднення.  
**Fig.1.** Compressive strength indicators of acid-resistant alkaline cements on the 28th day of hardening.

За результатами прискореного методу визначення кислотостійкості цементних систем, можна зробити висновок, що введення в систему до 6%  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  призводить до збільшення коефіцієнта кислотостійкості. Найкращий результат отримується при

наявності в компонент-ному складі 2%  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , при цьому коефіцієнт кислотостійкості складає  $K_c = 0,97$ , а втрата маси після випробування знаходиться в межах 10%. (Табл. 2).

**Табл. 2.** Результати випробування зразків з цементного тіста розміром 20x20 мм за експрес методом  
**Table 2.** Test results of cement dough samples measuring 20x20 mm using the express method

№	Вміст компонентів, %				Маса зразка, г		Показники міцності, МПа		$K_c$	$\Delta m$ , %
	мета-силікат	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	мета-каолін	шлак	до випроб.	після випроб.	до випроб.	після випроб.		
1	10	0	0	90	18,6	17,9	76,3	56,0	0,73	3,7
2	10	2	0	88	17,9	16,1	75,0	72,5	0,97	10,1
3	10	4	0	86	18,1	16,9	50,0	42,5	0,85	6,6
4	10	6	0	84	18,0	16,2	57,5	50,0	0,87	10,0
5	10	0	10	80	16,8	15,2	57,5	47,5	0,83	9,5
6	10	2	10	78	17,0	15,3	40,0	22,5	0,56	10,0
7	10	4	10	86	15,9	13,3	35,0	17,5	0,50	16,4
8	10	6	10	84	15,5	13,3	40,0	20,0	0,50	14,2

Метод витримування зразків у 5% розчині  $H_2SO_4$  підтверджує ефективність використання даної солі для підвищення кислотостійкості лужних цементів. Оптимальним залишається її вміст у кількості 2% (втрата міцності після 30 діб витримування

складає 15,7%). Після 90 діб витримування у 5% розчині  $H_2SO_4$ , найменшим показником втрати міцності (25,7%) характеризується склад з додаванням  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  у кількості 4%. При цьому збільшення об'єму зразків підвищилось до 3,3%. (Табл. 3).

**Табл. 3.** Показники міцності при стиску кислотостійких лужних цементів з використанням  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  після витримування у 5% розчині  $H_2SO_4$

**Table 3.** Compressive strength indicators of acid-resistant alkaline cements using  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  after aging in 5%  $H_2SO_4$  solution

№	Вміст компонентів, %				В/Ц	Показники міцності, МПа			
	мета-силікат	$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	мета-каолін	шлак		60 діб при н.у.	30 діб при дії р-ну $H_2SO_4$	90 діб при н.у.	90 діб при дії р-ну $H_2SO_4$
1	10	0	0	90	0,36	42,2	34,1	46,4	22,1
2	10	2	0	88	0,36	35,6	30,0	47,8	29,9
3	10	4	0	86	0,36	40,1	28,8	54,8	40,7
4	10	6	0	84	0,35	57,0	29,0	55,5	39,6
5	10	0	10	80	0,39	40,3	26,7	47,4	39,8
6	10	2	10	78	0,39	5,4	1,6	-	-
7	10	4	10	86	0,38	2,4	1,2	-	-
8	10	6	10	84	0,37	3,0	2,6	-	-

Середня густина зразків виготовлених за даними рецептурами складає 2300-2450  $кг/м^3$  (рис.2).



**Рис.2.** Показники середньої густини складів з додаванням  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ .

**Fig.2.** Indicators of the average density of compositions with the addition of  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$

### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати підтверджують можливість підвищення показника кислотостійкості лужних цементів шляхом введення  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ .

У відповідності до значення коефіцієнта кислотостійкості, який становить  $K_c \geq 0,8$ , цементи розроблені на основі даних композиційних складів є кислотостійкими. Це підтверджується і показником втрати маси зразків після проведення досліджень, який складає менше 10%. А додаткове введення  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ , має позитивний вплив на

показники ТНГ, термінів тужавлення та міцності.

Наступним етапом досліджень є вивчення впливу виду кислотного середовища на основні фізико-механічні характеристики розроблених складів кислотостійких цементів за наступних умов тверднення зразків:

- нормальні ( $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;  $R.H. = 95 \pm 5\%$ );
- розчин сірчаної кислоти ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), концентрацією 5%;
- розчин соляної кислоти ( $\text{HCl}$ ), концентрацією 5%;
- розчин азотної кислоти ( $\text{HNO}_3$ ), концентрацією 5%.

**Подяка.** Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проекту (реєстраційний № 0122U001199), який виконується за рахунок бюджетного фінансування в 2022-2023 рр.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Aiken, T. A., Gu, L., Kwasny, J., Huseien, G. F., McPolin, D., & Sha, W. (2022). Acid resistance of alkali-activated binders: A review of performance, mechanisms of deterioration and testing procedures. // *Construction and Building Materials*, 342, 128057.
2. Damion, T., & Chaunsali, P. Evaluating acid resistance of Portland cement, calcium aluminate cement, and calcium sulfoaluminate based cement using acid neutralisation. (2022). *Cement and Concrete Research*, 162, 107000.
3. Hashem, F. S., Amin, M. S., El-Gamal, S. M. A. (2013). Improvement of acid resistance of Portland cement pastes using rice husk ash and cement kiln dust as additives. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 111(2), 1391-1398.
4. Зозулинєць В.В., Ковальчук О.Ю., Перспектива розробки кислотостійких гібридних цементів на основі лужно-активованих в'язучих речовин // *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. – 2022. – Вип. 50 – С. 15-21.*
5. Кривенко П.В. Специальные шлако-щелочные цементы – К.: Будівельник, 1992. – 192 с.
6. Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. // *ACI Materials Journal*, 105(2), 131.
7. Бродко О.А. Шлакощелочные вяжущие и бетоны повышенной кислотостойкости. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Киев 1991 г.
8. Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindaprasit, P. (Eds.). (2014). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Elsevier.
9. Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48.
10. Krivenko, P. (2017). Why alkaline activation—60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 323-333.
11. Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. // *Advances in cement research*, 7(27), 93-102
12. Krivenko, P., Petropavlovskiy, O., Kovalchuk, O. A comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of the alkali-activated slag cement and concrete / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Volume 1, Issue 6-91, 2018, pp. 33-39.
13. Bernal, S.A., Rodríguez, E.D., Mejía de Gutiérrez, R., & Provis, J. L. (2012). Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3), 138-151.
14. Bašćarević, Z. (2015). The resistance of alkali-activated cement-based binders to chemical attack. In *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes* (pp. 373-396).
15. Idrees, M., Hussain, A., Saeed, F., Hussain, T. (2021). Effectiveness of metakaolin and hybrid polymers incorporated mortar for the compressive strength and acid resistance of industrial and wastewater infrastructure. // *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(3)
16. Chen, Z., & Ye, H. (2022). Improving sulphuric acid resistance of slag-based binders by magnesium-modified activator and metakaolin substitution. *Cement and Concrete Composites*, 104605.
17. Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2003). Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete research*, 33(10), 1607-1611.
18. Wang, X., Wang, W., Liu, Q., Wang, S., Luo, H., Ji, S., & Zhu, J. (2022). Effects of metakaolin on sulfate and sulfuric acid resistance of grouting restoration materials.

*Construction and Building Materials*, 349, 128714.

19. Kong, L., Zhao, W., Xuan, D., Wang, X., & Liu, Y. (2022). Application potential of alkali-activated concrete for antimicrobial induced corrosion: A review. *Construction and Building Materials*, 317, 126169.
20. Yang, M., Zheng, Y., Li, X., Yang, X., Rao, F., & Zhong, L. (2022). Durability of alkali-activated materials with different C–S–H and NASH gels in acid and alkaline environment. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 619-630.

## REFERENCES

1. Aiken, T. A., Gu, L., Kwasny, J., Huseien, G. F., McPolin, D., & Sha, W. (2022). Acid resistance of alkali-activated binders: A review of performance, mechanisms of deterioration and testing procedures. // *Construction and Building Materials*, 342, 128057.
2. Damion, T., & Chaunsali, P. Evaluating acid resistance of Portland cement, calcium aluminate cement, and calcium sulfoaluminate based cement using acid neutralisation. (2022). *Cement and Concrete Research*, 162, 107000.
3. Hashem, F. S., Amin, M. S., El-Gamal, S. M. A. (2013). Improvement of acid resistance of Portland cement pastes using rice husk ash and cement kiln dust as additives. // *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 111(2), 1391-1398.
4. Zozulynets V.V., Kovalchuk O.Iu., Perspektyva rozrobky kyslotostiikykhyh hibrydnykhyh tsementiv na osnovi luzhnoaktyvovanykhyh viazhuchykh rechovyn // *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn. – 2022. – Vyp. 50 – S. 15-21. (in Ukrainian)*
5. Krivenko P.V. Spetsialnie shlakoshchelochne tsementi – K.: *Budivelnik*, 1992. – 192 s. (in Russian)
6. Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal*, 105(2), 131.
7. Brodtko O.A. Shlakoshchelochne vyazhushchie i betoni povishennoi kislotostoikosti. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, Kiev 1991 g. (in Russian)*
8. Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindaprasit, P. (Eds.). (2014). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Elsevier.
9. Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48.
10. Krivenko, P. (2017). Why alkaline activation—60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. // *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 323-333.
11. Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. // *Advances in cement research*, 7(27), 93-102.
12. Krivenko, P., Petropavlovskiy, O., Kovalchuk, O. A comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of the alkali-activated slag cement and concrete / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Volume 1, Issue 6-91, 2018, pp. 33-39*.
13. Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., & Provis, J. L. (2012). Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids. // *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3), 138-151.
14. Baščarevc, Z. (2015). The resistance of alkali-activated cement-based binders to chemical attack. // *In Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes (pp. 373-396)*.
15. Idrees, M., Hussain, A., Saeed, F., Hussain, T. (2021). Effectiveness of metakaolin and hybrid polymers incorporated mortar for the compressive strength and acid resistance of industrial and wastewater infrastructure. // *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(3)
16. Chen, Z., & Ye, H. (2022). Improving sulphuric acid resistance of slag-based binders by magnesium-modified activator and metakaolin substitution. *Cement and Concrete Composites*, 104605.
17. Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2003). Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. // *Cement and Concrete research*, 33(10), 1607-1611.
18. Wang, X., Wang, W., Liu, Q., Wang, S., Luo, H., Ji, S., & Zhu, J. (2022). Effects of metakaolin on sulfate and sulfuric acid resistance of grouting restoration materials. // *Construction and Building Materials*, 349, 128714.
19. Kong, L., Zhao, W., Xuan, D., Wang, X., & Liu, Y. (2022). Application potential of alkali-activated concrete for antimicrobial induced corrosion: A review. *Construction and Building Materials*, 317, 126169.
20. Yang, M., Zheng, Y., Li, X., Yang, X., Rao, F., & Zhong, L. (2022). Durability of alkali-activated materials with different C–S–H and NASH gels in acid and alkaline environment. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 619-630.

F., & Zhong, L. (2022). Durability of alkali-activated materials with different C-S-H and NASH gels in acid and alkaline environment. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 619-630.

### EFFECT OF ADDITIONAL INPUT OF $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ON ACID RESISTANCE INDICATORS OF HYBRID ALKALINE CEMENTS

Viktoriia ZOZULYNETS  
Oleksandr KOVALCHUK

**Summary.** This work is devoted to the study of the direct influence of phosphate salt, using the example of trisodium phosphate ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), on the acid resistance index of hybrid alkali-activated cements. After all, acid resistance is becoming an increasingly important property for cement materials due to a wide range of applications where they are exposed to aggressive acid environments, especially in the chemical and food industries. In addition to the above, these include sewage systems, agricultural environments, oil wells, acid rain, and much more.

Conventional Portland cement binders are known to be sensitive to acid attack due to the

chemical nature of their main hydrated phases. Binders activated by alkali are an alternative to traditional Portland cement and are characterized by a number of special properties, especially if appropriate modifications are made to the component compositions of these cements. One of the main properties characteristic of alkali-activated binders is their resistance to the influence of aggressive environments.

Based on the literature analysis and taking into account the domestic and world assets in this direction, a number of model systems were developed based on blast furnace granulated slag and an alkaline component using phosphate salt with different percentages. Thus, the object of the research is the slag-alkaline system "furnace granulated slag - alkaline component (represented by sodium metasilicate pentahydrate) - trisodium phosphate". In the course of research, the main physical and mechanical characteristics of the developed compounds were determined and the results were analyzed. Determination of the acid resistance index ( $K_s \geq 0.8$ ) confirmed the feasibility of using  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  in the production of acid-resistant alkali-activated cements.

**Keywords.** Alkaline-activated binders; acid resistance; phosphate bonds; normal conditions; operating environment; trisodium phosphate.

*Стаття надійшла до редакції 18.05.2023*