

DOI: 10.32347/2076-815x.2022.81.189-198

УДК 691.5

к.т.н., с.н.с. **Ковальчук О.Ю.**,

kovalchuk.oju@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6337-0488,

Зозулинець В.В., zozulinets555@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8066-2033,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ КИСЛОТОСТІЙКОСТІ ГІБРИДНИХ ЛУЖНИХ ЦЕМЕНТІВ НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДНЕННЯ

Однією із причин втрати основних виробничих фондів на сьогоднішній день для виробництв хімічної промисловості, харчової та спеціальних видів промисловості є деградація виробничого обладнання та основних конструкцій цехів внаслідок кислотної корозії бетону. Матеріали, що традиційно використовуються у таких умовах, характеризуються цілим спектром недоліків – високою собівартістю, низькою водостійкістю, складністю технології та небезпекою для персоналу при укладанні.

Одним із варіантів отримання кислотостійких матеріалів є використання лужних в'язучих речовин, що відомі своєю високою стійкістю до дії агресивного середовища. Підвищення кислотостійкості матеріалу можливе за рахунок зниження ступеню основності системи.

Представлені дослідження довели можливість отримання кислотостійких матеріалів, що здатні тверднути у нормальних умовах, а також можливість часткової заміни кондиційних алюмосилікатних матеріалів на алюмосилікати техногенного походження, зокрема, на червоний шлам виробництва алюмінію. Зниження основності системи дозволяє підвищити коефіцієнт корозійної стійкості матеріалу до дії кислотного середовища до 88%.

Ключові слова: лужні в'язучі речовини; кислотостійкість; утилізація відходів

Постановка проблеми. Ефективність та унікальність лужних в'язучих речовин та матеріалів на їх основі давно підтверджена світовими тенденціями розвитку будівельної галузі. Такі системи представляють собою не тільки альтернативу традиційному портландцементу, а й характеризуються цілою низкою спеціальних властивостей, особливо за умови проведення відповідних модифікацій компонентних складів даних цементів. Однією з основних властивостей, характерних для лужноактивованих в'язучих речовин, є стійкість до впливу агресивних середовищ.

Результатом впливу агресивного середовища на цементний камінь є руйнування та виведення з експлуатації будівельних конструкцій. Безумовно, це призводить до значних матеріальних, фінансових та енергетичних затрат, не говорячи вже про людські ресурси. Якщо взяти за приклад підприємства хімічної, харчової та сільськогосподарської промисловостей, то їх головною проблемою є руйнівний вплив кислого середовища на об'єкти, де безпосередньо проводяться основні технологічні процеси даних підприємств. І на даному етапі, єдиним найбільш вигідним рішенням для вказаних об'єктів є часта заміна виведених з експлуатації будівельних елементів. Звісно, на ринку будівельних матеріалів є цементи та вироби, які характеризуються високими показниками кислотостійкості. Проте, вони мають вагомні недоліки, які так само призводять до деструкції матеріалу, зокрема, низька водостійкість, складність технології отримання, тощо, що знову наштовхує на необхідність вивчення процесів впливу агресивних середовищ на штучний камінь, зокрема, отриманий на основі лужних цементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Матеріали на основі традиційних в'язучих речовин, зокрема, портландцементу, є нестійкими до впливу дії агресивного середовища, перш за все через наявність вільного портландиту ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), високоосновних гідросилікатів кальцію та еtringіту в структурі затверділого цементного каменю. На відміну від портландцементу, фазовий склад лужноактивованих в'язучих змінюється в широкому інтервалі новоутворень системи $\text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Із підвищенням у складі цементного каменю цеолітоподібних фаз системи $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ мікроструктура покращується, що призводить до підвищення довговічності [2].

Саме тому використання лужноактивованих в'язучих речовин є перспективним напрямком досліджень для отримання кислотостійких матеріалів. Як показує аналіз робіт, спроба підвищення кислотостійкості лужноактивованих в'язучих пов'язана як зі спробою зниження основності гідросилікатів кальцію за рахунок введення SiO_2 -вміщуючих фаз так і з підвищенням у фазовому складі цементного каменю цеолітоподібних фаз за рахунок введення природних цеолітів або Al_2O_3 -вміщуючих фаз, які сприяють їх синтезу.

Так, в роботі [3] наведено, що найбільшою кислотостійкістю характеризуються зразки, до складу яких входить 20% висококремнеземистої дегідратованої цеолітової породи, що містить мінерали шабазит і морденіт ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 8,8 \dots 10,0$). При цьому коефіцієнт стійкості випробуваних зразків складає $K_c = 1,55$. Застосування цеолітових порід, що містять наряду з шабазитом стильбіт ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,2 \dots 8,0$) дозволяє отримати зразки з $K_c = 1,39$,

а використання порід, включаючих натроліт і шабазит, визначає синтез матеріалу з коефіцієнтом стійкості $K_c=0,98$.

Позитивний вплив метакаоліну, як основного джерела Al_2O_3 чітко відображений в дослідженнях геополімерних систем. Відповідно до [5], було зафіксовано низький ступінь вилуговування геополімеру на основі метакаоліну під впливом води та оцтової кислоти. При цьому вилуговування обмежується лише поверхневим шаром, який безпосередньо піддається дії агресивного розчину, тоді як внутрішні частини геополімерного каркасу залишаються цілими. Також при введенні метакаоліну процеси структуроутворення лужноактивованих в'язучих систем на основі шлаку протікають з більшою інтенсивністю, у порівнянні з системами до складу яких входить каолін [6].

В одночас, ряд досліджень показують [7-12], що найвищою стійкістю до дії агресивних середовищ характеризуються матеріали, що характеризуються зниженою основністю новоутворень [13-15].

Мета дослідження - отримання кислотостійких гібридних систем на основі лужноактивованих в'язучих речовин. Досягнути цього можна за рахунок комплексного підходу який включає: з одного боку – зниження основності системи (формування низькоосновних гідросилікатів (CSH)), з перспективою подальшої перекристалізації у стійкі цеолітоподібні фази типу NASH.

Основні завдання приведенного дослідження:

- дослідити вплив виду кислотного середовища на втрату маси та залишкову міцність цементів;
- встановити придатність розроблених складів до подальшої оптимізації та отримання кислотостійких систем
- оцінити можливість використання промислових відходів та супутніх продуктів виробництва для отримання кислотостійких матеріалів..

Матеріали і методи досліджень

Як основний алюмосилікатний компонент лужного цементу використовували шлак доменний гранульований виробництва ПАТ «ДМЗ», розмелений до питомої поверхні $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ за Блейном.

Як джерело додаткової алюмосилікатної складової використовували дегідратований каолін (метакаолін) Глуховецького родовища.

Як джерело силікатної складової використовували мелений трепел.

Як джерело алюмосилікатів техногенного походження використовували червоний шлам – відхід виробництва алюмінію за методом Байєра Миколаївського глиноземного комбінату.

Лужний компонент системи було представлено сумішшю карбонату натрію та метасилікату натрію.

Кислотостійкість матеріалу оцінювали за експрес-методом шляхом кип'ятіння зразків протягом 1 години у 35% розчині сірчаної кислоти. Як критерії оцінки було обрано показники зовнішнього вигляду, втрати маси після випробування та залишкову міцність після випробування.

Результати і обговорення

Дослідження кислотостійкості зразків, проведені за прискореним методом, дають можливість попередньо оцінити придатність досліджуваних композицій до подальшої оптимізації з метою отримання кислотостійких матеріалів нормального тверднення.

На першому етапі досліджували кислотостійкість комплексних цементних композицій в системі «доменний гранульований шлак – метакаолі – трепел – лужний компонент». Результати проведених досліджень показані у Таблиці 1 та на Рисунку 1.

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що залишкова міцність та цілісність матеріалу після кип'ятіння у кислоті прямопропорційно залежить від вмісту шлакової складової. Водночас, також можна відмітити, що при рівному вмісті шлаку як основного алюмосилікатного компоненту, найвищими показниками залишкової міцності та маси зразку характеризуються системи, у яких був вищий вміст силікатної складової (трепелу), що дозволяє говорити про підтвердження теоретичних припущень про можливість отримання кислотостійких систем нормального тверднення за рахунок зниження силікатного модуля системи.

Таблиця 1

Результати випробування зразків на кислотостійкість (на 7 добу) за прискореним методом

| Маркування | Компонентний склад, % | | | | | ТНГ, % | рН | Маса зразків, г | |
|------------|-----------------------|-------------|--------|------|--------------|--------|------|-----------------|----------------|
| | шлак | мета-каолін | трепел | сода | мета-силікат | | | m ₁ | m ₂ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| A1 (K9) | 25 | 20 | 45 | 4 | 6 | 45 | 11,8 | 13,0 | 10,8 |
| A2 (K12) | 22 | 23 | 45 | 4 | 6 | 40 | 11,8 | 12,8 | 4,8 |
| A3 (K8) | 25 | 25 | 40 | 4 | 6 | 45 | 11,8 | 13,7 | 0 |
| A4 (K28) | 30 | 20 | 40 | 4 | 6 | 44 | 11,8 | 13,4 | 8,5 |
| A5 (K14) | 25 | 30 | 35 | 4 | 6 | 40 | 12,0 | 14,0 | 10,0 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|----|----|----|---|---|------|------|-------|------|
| A6 (K15) | 33 | 25 | 30 | 5 | 7 | 36 | 12,0 | 14,2 | 12,3 |
| A7 (K16) | 30 | 30 | 30 | 4 | 6 | 37,5 | 12,0 | 14,75 | 13,0 |
| A8 (K17) | 40 | 30 | 20 | 4 | 6 | 35 | 12,0 | 15,0 | 13,4 |
| A9 (K18) | 45 | 35 | 10 | 4 | 6 | 34 | 12,0 | 15,2 | 13,7 |

У той же час, використання значного вмісту метакаоліну та трепелу призводить до значного підвищення собівартості системи, що негативно впливатиме на перспективи використання такого матеріалу. З метою оцінки можливості зниження собівартості матеріалу та підвищення екологічності матеріалу на другому етапі досліджень було розглянуто можливість часткової заміни алюмосилікатних компонентів на червоний шлам (відхід виробництва алюмінію). В звичайних цементних системах використання значної кількості червоного шламу не є можливим з огляду на високий вміст сполук лужних металів та важких елементів, проте це не є проблемою для лужних цементів, що доведено у низці публікацій.

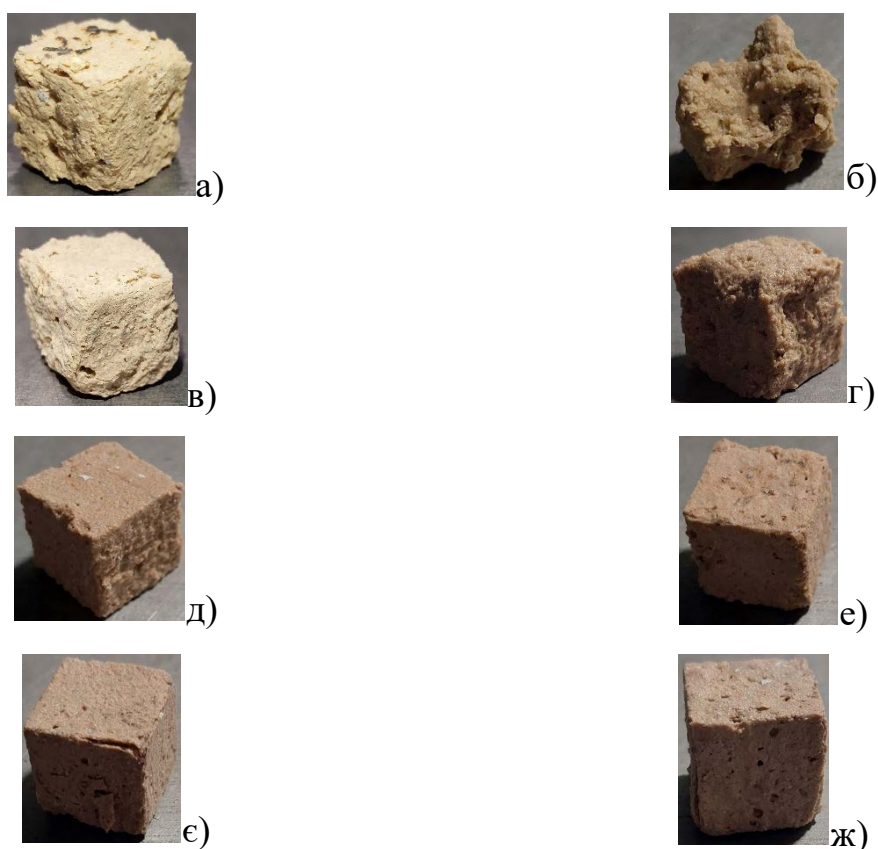


Рис.1. Зовнішній вигляд зразків після проведення випробування: а) А1 ; б) А2; в) А4; г) А5; д) А6; е) А7; є) А8; ж) А9.

Примітка: Зразок А3 (К8) після випробування повністю зруйнований

Результати проведених досліджень показано у табл. 2 та на рис. 2.

Таблиця 2

Результати випробування на кислотостійкість (на 7 добу) за прискореним методом при частковій заміні алюмосилікатної складової на червоний шлам

| Маркування | Компонентний склад, % | | | | | | ТНГ, % | рН | Маса зразків, г | |
|------------|-----------------------|-------------|--------|------|--------------|----|--------|------|-----------------|----------------|
| | шлак | Мета-каолін | трепел | сода | мета-силікат | ЧШ | | | m ₁ | m ₂ |
| A10 (K19) | 25 | 25 | 20 | 4 | 6 | 20 | 35 | 12,0 | 15,2 | 11,3 |
| A11 (K20) | 30 | 20 | 20 | 4 | 6 | 20 | 35 | 12,0 | 15,9 | 13,6 |
| A12 (K24) | 30 | 30 | 15 | 4 | 6 | 15 | 33 | 12,0 | 15,3 | 13,5 |
| A13 (K25) | 35 | 25 | 15 | 4 | 6 | 15 | 30 | 12,0 | 15,3 | 13,9 |
| A14 (K26) | 40 | 30 | 10 | 4 | 6 | 10 | 32 | 12,0 | 15,3 | 13,3 |
| A15 (K27) | 43 | 35 | 5 | 5 | 7 | 5 | 31 | 12,0 | 15,8 | 13,6 |



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис.2. Зовнішній вигляд зразків після проведення випробування:
а) A10; б) A11; в) A12; г) A13; д) A14; е) A15.

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що використання червоного шламу на заміну частини алюмосилікатного компонента не призводить до зниження стійкості матеріалу до дії корозійного середовища при кип'ятінні. Найменшими руйнуваннями внаслідок кип'ятіння характеризуються матеріали із найбільшим вмістом алюмосилікатної складової при одночасному підвищеному вмісті силікатного компонента в системі.

Вивчення міцнісних властивостей досліджуваних композицій показало, що найбільшою залишковою міцністю характеризуються системи із підвищеним вмістом алюмосилікатної складової та зниженим силікатним модулем системи, що відповідає теоретичним передумовам. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію компонентного складу кислотостійких систем на основі гібридних цементів та підвищенню їх функціональних властивостей, зокрема, міцності при стиску, залишкової міцності після випробування, розширення, усадки, тощо.

Висновки.

За результатами проведених досліджень було підтверджено, що зниження модулю основності цементної системи підвищує кислотостійкі властивості матеріалу. Коефіцієнт корозійної стійкості матеріалу (відношення міцності матеріалу після дослідження до міцності матеріалу од випробування) підвищується до 0.88, що дозволяє вважати матеріал корозійно стійким. Часткова заміна алюмосилікатної складової на відхід виробництва алюмінію за методом Байера дозволяє не тільки знизити основність системи та підвищити кислотостійкість матеріалу, але й у перспективі підвищує екологічність технології та знижує собівартість продукції.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, яка виконується в рамках бюджетного фінансування Міністерства освіти і науки України № 0122U001199, «Розробка кислотостійких гібридних лужних цементів в системі $R_2O - CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ і матеріалів на їх основі з підвищеними експлуатаційними характеристиками»

Список літератури

1. Palomo A. Krivenko P. Garcia-Lodeiro I. A review on alkaline activation: New analytical perspectives, *Materiales de Construccion* (2014) 64(315) <https://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>
2. John L. Provis, Peter Duxson, Elena Kavalerova, Pavel V. Krivenko, Zhihua Pan, Francisca Puertas, and Jannie S.J. van Deventer. *Alkali Activated Materials. Historical Aspects and Overview.* (Chapter 2). Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2014. ISSN 2213-204X. DOI 10.1007/978-94-007-7672-2
3. Бродко О.А. Шлакощелочные вяжущие и бетоны повышенной кислотостойкости. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Киев, 1991.

4. Khan M.N., Kuri J.C., Sarker P.K. Sustainable use of waste glass in alkali activated materials against H₂SO₄ and HCl acid attacks. *Cleaner Engineering and Technology* 6 (2022) 100354. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100354>
5. Ukrainczyk N., Vogt O. Geopolymer leaching in water and acetic acid (2021). *RILEM Technical Letters* (2020) 5: 163-173 <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.124>
6. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.119624>
7. Грабовчак В.В. Лужні золівмісні цементи та бетони на їх основі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби» / В.В. Грабовчак; КНУБА. – Київ, 2013. – 12 с.
8. Киричок В.І. Лужні алюмосилікатні зв'язуючі з підвищеною сульфатостійкістю та покриття на їх основі для захисту бетону: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби» / В.І. Киричок; КНУБА. – Київ, 2018. – 22 с.
9. Кривенко П. Утилизация и иммобилизация различных токсичных отходов / П. Кривенко, Ж. Скурчинская, А. Гелевера // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – №5. – С. 62-66.
10. Назим О.А. Зололужні цементи і бетони, модифіковані штучними цеолітами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби» / О.А. Назим; КНУБА. – Київ, 2004. – 22 с.
11. Alkali-activated binders based on metakaolin. Sele, L., Bajare, D., Bumanis, G., Dembovska, L. *Proc. of the 10th Int. Scient. And Pract. Conference*. (2015). Volume 1, 200-204.
12. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., Fernandez-Jimenez, A. *Materiales de Construccion*, (2014), 64, 315, e022. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>.
13. Ashok P. Experimental Studies On Concrete Utilising Red Mud As A Partial Replacement Of Cement With Hydrated Lime / P. Ashok, M. P. Sureshkumar. // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. – 2013. – p. 1–10.
14. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water / [M. Zhang, M. Zhao, G. Zhang etc.]. // *CBM*. – 2016. – Vol. 124. – P. 373–382.
15. Ковальчук О.Ю. Розробка складів лужних цементів загальнобудівельного призначення з використанням червоного шламу / О.Ю. Ковальчук, А.В. Пасько, В.Є. Фіалка // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр.* – Рівне: НУВГП. – 2015. – №31. – С. 266–272.
16. Uchikawa H. Binary and ternary components blended cement, in: S. L. Sarkar (Ed), *Mineral Additives in Cement and Concrete* / H. Uchikawa, T. Okamura // *ABI Books Private Ltd.* – New Delhi, India, 1993. – P. 1–7.

PhD Kovalchuk Oleksandr, Zozulynets Victoriia,
Kyiv National University of Construction and Architecture

STUDY OF ACID RESISTANCE OF HYBRID ALKALI ACTIVATED NORMAL HARDENING CEMENTS

One of the reason of loses of main production sources nowadays for chemical, food and special industries is the degradation of equipment and constructions caused

by acid corrosion. Traditional materials are characterized by various disadvantages, among them: high costs of the material, low water resistance, hard technology and danger for the personal.

One of the ways to obtain acid resistant material is the use of alkali activated cements, which are known are the resistant to the aggressive environments. Increasing of acid resistance is possible by reducing of system basicity level.

The presented studies have proved the possibility to obtain acid resistant materials, able to be hardening in normal condition, so far as possibility to partial replacement of the conditional alumina silicates by alumina silicates with technogenic origin, namely, red mud from alumina production under Bayer process. Reducing of basicity level make it possible to increase corrosion resistance coefficient up to 0.88. Also thus a way material became more ecologically friendly and lowering the cost of material.

Key words: alkali activated binders; acid resistance; waste utilization

REFERENCES

1. Palomo A. Krivenko P. Garcia-Lodeiro I. A review on alkaline activation: New analytical perspectives, *Materiales de Construcción* (2014) 64(315) <https://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>. {in English}
2. John L. Provis, Peter Duxson, Elena Kavalerova, Pavel V. Krivenko, Zhihua Pan, Francisca Puertas, and Jannie S.J. van Deventer. *Alkali Activated Materials. Historical Aspects and Overview.* (Chapter 2). Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2014. ISSN 2213-204X. DOI 10.1007/978-94-007-7672-2. {in English}
3. Brodtko O.A. *Shlakoshchelochnyye viazhushchye y betony povyshennoi kyslotostoikosty. DySSERTatsyia na soyskanye uchenoi stepeny kandydata tekhnicheskikh nauk*, Kyev 1991 h. {in Russian}
4. Khan M. N. N., Kuri J. C., Sarker P. K. Sustainable use of waste glass in alkali activated materials against H₂SO₄ and HCl acid attacks. *Cleaner Engineering and Technology* 6 (2022) 100354. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100354>. {in English}
5. Ukrainczyk N., Vogt O. Geopolymer leaching in water and acetic acid (2021). *RILEM Technical Letters* (2020) 5: 163-173 <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.124>. {in English}
6. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.119624>. {in English}

7. Hrabovchak V.V. Luzhni zolovmisni tsementy ta betony na yikh osnovi: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand.tekhn. nauk: spets. 05.23.05 «Budivelni materialy ta vyroby» / V.V. Hrabovchak; KNUBA. – Kyiv, 2013. – 12 s. {in Ukrainian}
8. Kyrychok V.I. Luzhni aliumosylkatni zviazuiuchi z pidvyshchenoiu sulfatostiikistiu ta pokryttia na yikh osnovi dlia zakhystu betonu: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand.tekhn. nauk: spets. 05.23.05 «Budivelni materialy ta vyroby» / V.I. Kyrychok; KNUBA. – Kyiv, 2018. – 22 s. {in Ukrainian}
9. Kryvenko P. Utylyzatsyia y ymmobylyzatsyia razlychnykh toksychnykh otkhodov / P. Kryvenko, Zh. Skurchynskaia, A. Helevera // Ekotekhnolohyy y resursosberezhenye. – №5. – S. 62-66. {in Russian}
10. Nazym O.A. Zololuzhni tsementy i betony, modyfikovani shtuchnymy tseolitamy: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand.tekhn. nauk: spets. 05.23.05 «Budivelni materialy ta vyroby» / O.A. Nazim; KNUBA. – Kyiv, 2004. – 22 s. {in Ukrainian}
11. Alkali-activated binders based on metakaolin. Sele, L., Bajare, D., Bumanis, G., Dembovska, L. Proc. of the 10th Int. Scient. And Pract. Conference. (2015). Volume 1, 200-204. {in English}
12. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., Fernandez-Jimenez, A. *Materiales de Construccion*, (2014), 64, 315, e022. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>. {in English}
13. Ashok P. Experimental Studies On Concrete Utilising Red Mud As A Partial Replacement Of Cement With Hydrated Lime / P. Ashok, M. P. Sureshkumar. // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. – 2013. – p. 1–10. {in English}
14. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water / [M. Zhang, M. Zhao, G. Zhang etc.]. // *CBM*. – 2016. – Vol. 124. – P. 373–382. {in English}
15. Kovalchuk O.Iu. Rozrobka skladiv luzhnykh tsementiv zahalnobudivelnogo pryznachennia z vykorystanniam chervonoho shlamu / O. Yu. Kovalchuk, A. V. Pasko, V. Ye. Fialka // *Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy: Zb. nauk. pr.* – Rivne: NUVHP. – 2015. – №31. – S. 266–272. {in Ukrainian}
16. Uchikawa H. Binary and ternary components blended cement, in: S. L. Sarkar (Ed), *Mineral Additives in Cement and Concrete* / H. Uchikawa, T. Okamura // *ABI Books Private Ltd.* – New Delhi, India, 1993. – R. 1–7. {in English}