

УДК 691.3

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.38.831

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ ТЕС У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
МОСЬПАН В. І.², *канд. техн. наук, доц.*,
КОЛОХОВ В. В.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ДЗЮБАН О. В.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
МАЛЫЦЕВ С. В.⁵, *бакал.*

¹ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: derevianko.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

² Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: mospan.volodumir@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

^{3*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: kolokhov.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4131-0155

⁴ Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: dziuban.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4131-0155

⁵ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: kolokhov.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4131-0155

Анотація. Постановка проблеми. Основа сучасної енергетики – різні типи електростанцій, з яких ТЕС складають близько 40 %. Технологія виробництва електроенергії на ТЕС шкідлива, що пов'язано з утворенням великої кількості відходів. На них припадає понад 30 % викидів шкідливих речовин від загального обсягу викидів промислових підприємств. Підвищений попит на електроенергію зумовлює підвищення обсягів їх виробництва, що спричинює збільшення кількості золошлакових відходів і викидів шкідливих речовин в атмосферу. **Мета статті.** В Україні 160 тис. га із 60 млн га загальної площі займають відвали промислових відходів, або, як їх називають, вторинні продукти виробництва. Щорічно у країні утворюється близько 8 млн тонн золошлакових відходів, а їх зберігання супроводжується вкрай негативними наслідками для навколишнього середовища і здоров'я людини. Золошлакові відвали містять токсичні елементи, забруднюють ґрунт та підземні води, потребують відчуження великих територій. Обсяги вже накопичених відходів сягають понад 300 млн тонн і займають величезні площі земель. При цьому мало не всі золошлакові відвали українських вугільних ТЕС і ТЕЦ вже майже заповнені, тому для продовження роботи потрібні все нові і нові площі. **Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Згідно з даними європейських дослідників, поховання відходів обходиться в суму близько 60 євро / тонну. Середня ТЕС витрачає близько 12–36 млн євро на рік тільки на утримання золошламосховищ.

Ключові слова: золошлакові відходи; шкідливі речовини; токсичні елементи

MAIN DIRECTIONS OF RESEARCH ON THE USE OF TES ASH IN THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS

DEREVIANKO V.M.¹, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*,
MOSPAN V.I.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOLOKHOV V.V.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
DZIUBAN O.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MALTSEV S.V.⁵, *Bachelor*

¹ Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: derevianko.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

² Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: mospan.volodumur@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

^{3*} Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: kolokhov.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4131-0155

⁴ Department of Construction Production Technology, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: dziuban.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6279-346x

⁵ Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: kolokhov.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-4131-0155

Abstract. Formulation of the problem. The basis of modern energy – various types of power plants, of which thermal power plants is about 40 %. The technology of electricity production at thermal power plants is harmful due to the generation of large amounts of waste. They account for more than 30 % of emissions of harmful substances from the total emissions of industrial enterprises. Increased demand for electricity causes an increase in their production, which leads to an increase in the amount of ash and slag waste and emissions of harmful substances into the atmosphere.

The purpose of the article. In Ukraine, 160 thousand hectares out of 60 million hectares of total area are dumps of industrial waste, or as they are called by-products. About 8 million tons of ash and slag waste are generated in Ukraine every year, and their storage is accompanied by a number of extremely negative consequences for the environment and human health. With ash and slag dumps containing toxic elements polluting the ground water and underwater, require exclusion of large areas. The volume of already accumulated waste reaches more than 300 million tons and occupies huge areas of land. At the same time, almost all ash and slag dumps of Ukrainian coal-fired and thermal power plants are almost full, so more and more areas are needed to continue the work. **Analysis of recent research and publications.** According to European researchers, this type of waste disposal costs about 60 euros/ton. The average thermal power plant spends about 12...36 million euros a year just for the maintenance of ash dumps.

Keywords: ash and slag waste; harmful substances; toxic elements

Постановка проблеми. У наш час значна кількість золи використовується в будівельній індустрії (виробництво цементу, цегли, виробів із ніздрюватого бетону, шлакоблоків, легких заповнювачів, руберойду, керамзиту), у будівництві дамб золошлаковідвалів і ремонті доріг. За рахунок використання золошлакових матеріалів (ЗШМ) заощаджується до 30 % цементу й понад половина природних заповнювачів, знижується теплопровідність бетонів, зменшується маса будинків і споруд. Але в Україні використання золошлакових відходів, за даними Європейської асоціації продуктів згоряння вугілля (рис. 1), складає менше 20 %. Отож, використання ЗШВ являє собою одну з першорядних та актуальних екологічних проблем [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання золошлакових відходів ТЕС. Аналіз складу вугілля з різних родовищ показує, що його зольність, яка характеризує мінеральну складову, змінюється в широких межах і може досягати 50 % і більше. Основні компоненти мінеральної частини твердих горючих

копалин – це карбонати, сульфідні і глинисті матеріали, які зазнають у процесі термічної переробки значних перетворень.



Рис. 1. Дані Європейської асоціації продуктів згоряння вугілля щодо переробки вугільної золи

Золи поділяються на висококальцієві (вміст $\text{CaO} > 20\%$) і низькокальцієві (вміст $\text{CaO} < 20\%$). Інтегральною характеристикою хімічного складу зол є модуль основності MO , що для основних зол становить $\text{MO} > 0,9$; кислих – $0,6...0,9$; надкислих – $\text{MO} < 0,6$. В основних золах сумарний вміст суми оксидів кальцію й магнію досягає 50, у надкислих – 12 %.

Гранульовані шлаки являють собою механічну суміш зерен розміром 0,14...20 мм. Хімічний склад шлаків, як і зол, може змінюватися в широкому діапазоні – від надкислих ($MO < 0,1$) до основних ($MO > 1$). Багато паливних шлаків характеризуються значною кількістю (20 % і більше) оксидів заліза, що містяться в основному в захисній формі.

Вміст склоподібної фази становить 85...98 %, в основних шлаків він може бути значно нижчим. У кристалічній фазі можлива наявність двокальцієвого силікату, муліту, геленіту, псевдоволластоніту й інших мінералів. Теплова електростанція, яка працює на вугіллі, дає тверді відходи, що містять такі компоненти як SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O та інші. Також є сірка і сполуки на її основі. Велика частина (як правило, понад 90 %) припадає на дві основних сполуки – діоксид кремнію (SiO_2) – близько 65 %; діоксид алюмінію (Al_2O_3) – близько 25 %.

Ці сполуки можуть застосовуватися у виробництві будівельних матеріалів, таких як цегла, газобетон, сухі будівельні суміші, добавки для виробництва різних бетонів у будівельній індустрії, золошлакові суміші і золи сухого вловлювання – як сировина для цементів і безклінкерних в'язучих, бетонів (важких, легких, пористих), пористих заповнювачів, силікатних, керамічних, теплоізоляційних та інших матеріалів [4].

Згідно з даними європейських дослідників, поховання відходів обходиться в суму близько 60 євро/т. Середня ТЕС може витратити близько 12...36 млн євро в рік тільки на утримання золошламосховищ. Рівень утилізації золошлакових відходів у розвинених країнах становить близько 50 %, у Франції і Німеччині – 70 %, а в Фінляндії – близько 90 % їх поточного виходу. Європейська асоціація з утилізації продуктів згоряння вугілля (Coal Combustion Products) заснована в 1990 році. До неї входять 28 енергетичних компаній з 15 країн, що випускають 88 % золошлакових

матеріалів у ЄС. В Європі кратне збільшення обсягів переробки ЗШМ почалося з уведення загальних для Євросоюзу політичних директив, що регулюють викиди у вугільній промисловості. Найвідоміші стандарти – IPPC, LCPD, IED. У 2010 році країни Тихоокеанського регіону (Китай, Індонезія, Австралія) створили свою Азіатську асоціацію вугільної золи (Asian Coal Ash Association). Тут регулярно публікують звіти і рішення стосовно переробки золошлакових відходів.

Існує п'ять основних напрямків переробки ЗШМ (у порядку спадання популярності):

- будівельні матеріали (цемент, цегла, блоки) (рис. 2);
- дорожнє будівництво;
- будівельні проекти (монолітний стіновий матеріал);
- виробництво різних наповнювачів;
- сільське господарство (стабілізатори ґрунту).

Сфера використання зол: у дорожньому будівництві (для спорудження земляного полотна, влаштування для укріплених підстав, зведення насипів, влаштування дорожнього одягу), для стабілізації ґрунтів: зміцнення слабких ґрунтів (піски, торфовища), як добавки до в'язучих із метою їх економії для зміцнення ґрунтів; в асфальто- і цементобетонних розчинах (як заповнювач і мінеральний порошок в асфальтобетонах); для гідротехнічних насипних споруд, золи сухого вловлювання – сланцеву електрофільтрову золу (рис. 3) можна застосовувати як самостійне в'язуче, а також як активну добавку до неорганічних і органічних в'язких речовин [2].

Мікросфери (рис. 4). Діаметр частинок у середньому становить від 10...20 до 500 мк. Матеріал має низку унікальних властивостей: низьку щільність, високу механічну міцність, хімічну інертність, термостійкість, низьку теплопровідність.

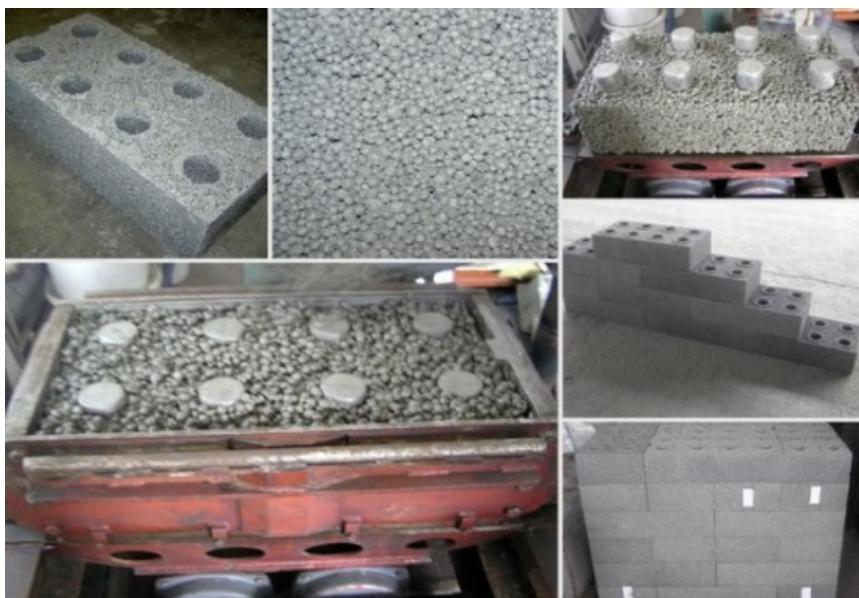


Рис. 2. Золошлакові блоки



Рис. 3. Зола сухого вловлювання



Рис. 4. Мікросфери

Сьогодні золовідвали української теплогенерації заповнені на 50 %, а в деяких випадках і зовсім на 95 %. Наприклад, наразі ТЕС компанії ДТЕК щорічно продукують близько 5 млн т вугільних відходів. Нескладно порахувати, що за таких темпів можливості для їх зберігання будуть вичерпані вже через 5–10 років. На деяких підприємствах ця ситуація ще гірша – їх золовідвали будуть переповнені всього через 3–4 роки.

В Україні основні покупці вторсировини, такі як суха зола або шлак, – це виробники будматеріалів: цементу, бетону і сухих сумішей (рис. 3). Раніше потенціал вторсировини був сильно недооцінений, тепер же його популярність почала зростати.

Спосіб отримання цементу, до складу якого входить змішаний і спільний помел портландцементного клінкеру з гіпсом та активна мінеральна алюмінієво-кремнієва добавка, яка відрізняється тим, що як активна мінеральна добавка використовуються техногенно термооброблений алюміній – кремній і відходи мінеральної сировини у вигляді золи – виносу ТЕС від спалення вугілля, термообробленого за 950...1 050 °С, або у вигляді золи териконів – горілої породи шахтних відвалів вугільних родовищ,

термооброблених за 600...850 °С, в кількості 5...25 % від ваги клінкеру [5].

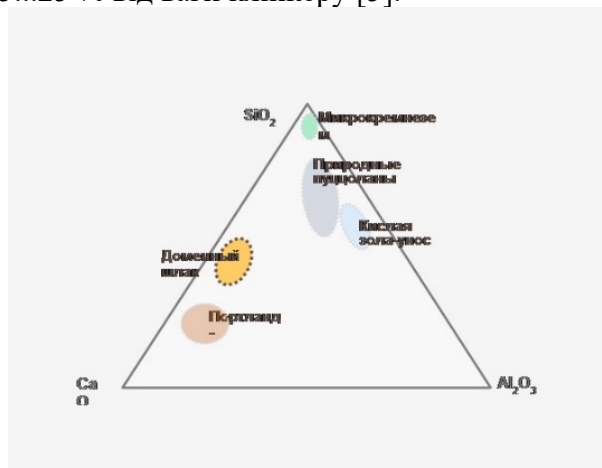


Рис. 5. Добавки (інертні; активні)

Високою стійкістю до дії вологи відрізняються автоклавні золобетони:

- інертні добавки-наповнювачі – вводяться для поліпшення гранулометричного складу цементу, ущільнення його структури (вапняк);
- активні мінеральні добавки – мають пуцоланічну активність, тобто взаємодіють з гідроксидом кальцію, який утворюється в значній кількості (15...20 %).



Рис. 6. Цех золи виносу для бетону

Проблема утилізації золошлакових відходів може бути вирішена за допомогою технології TITAN HYPERPRESS, вартість перетворення однієї тони золошлакових відходів на цеглу приблизно відповідає 20 євро.



Рис. 7. Потенціал використання відходів порожньої породи



Рис. 8. Різноманітність кольорів вихідного продукту

Комплексними в'язучими з активними компонентами у вигляді золи зміцнюються піщано-щебеневі ґрунти, одержувані подрібненням маломіцних вапнякових і піщаних (або інших) порід, дерева вивержених і метаморфічних порід, відходи після дробіння каменю або великоуламкові відходи промислових підприємств.

Досліджувалося зміцнення зв'язкових ґрунтів (суглинків і глин із числом пластичності до 21) золою з добавками хімічних речовин або як компонент комплексного в'язучого.

Велика кількість наукових досліджень вітчизняних і закордонних вчених присвячена вивченню золи-виносу як добавки в бетон замість частини цементу або як добавки у цемент (спільний помел із клінкером). Рекомендовано золу використовувати як добавку в бетон в кількості 10...30 % від маси цементу. Такий метод практично не підвищує водопотреби бетонної суміші. Однак, незважаючи на цей

факт, більшість результатів досліджень показують, що міцність бетону нормального твердіння в 28-добовому віці за часткової заміни цементу золою знижується порівняно з міцністю бетонів базового складу.

За даними багатьох дослідників добування золи в невеликій кількості позитивно впливає на властивості бетону: зменшується тепловиділення в початковий період твердіння, знижуються усадкові деформації, а також зменшується повзучість бетону [6].

Аналіз результатів досліджень і досвід промислового використання золи-виносу ТЕС як добавки в бетон замість частини цементу в нашій країні і за кордоном показує, що такий напрямок використання золи поряд із певними перевагами має і недоліки, головні з яких – зниження міцності і довговічності бетону, незначна питома витрата золи (20...60 кг/м³ бетону).

Наразі незначні обсяги і низька ефективність використання золи на підприємствах будіндустрії, малі обсяги утилізації відходів енергетики не дозволяють проектувати на великих теплових електростанціях маловідходні та безвідходні технології.

Мали місце спроби підвищення питомої витрати золи в бетоні за рахунок заміни значної частинки цементу під час гідротехнічного будівництва. Однак у разі заміни золою 40...50 % цементу міцність бетону у віці 180 діб виявлялася значно нижчою за таку міцність у бетоні базового складу.

Новий підхід до використання в будівництві відходів ТЕС запропонував А. М. Сергєєв. Так, зола ТЕС розглядалася як найважливіший інгредієнт, який відіграє роль активного мікронаповнювача і виконує функцію структуротвірного мікрокомпонента. Переглянуто сформовані раніше уявлення про роль золи в золоцементних складах і запропоновано новий механізм твердіння золоцементних систем, що задовільно пояснює високу міцність високонаповненого золоцементного каменю і бетону в порівняно ранньому віці і в більш пізні терміни.

Дослідження А. М. Сергєєва показали, що шлак теплових електростанцій за комплексом фізико-механічних властивостей відповідає вимогам, які пред'являються до заповнювачів, і може бути використаний для виготовлення бетонів різних класів.

Досить високий ефект підвищення міцності бетону за теплової обробки досягався уведенням до складу бетонної суміші добавки (СДБ + ХК). Цей ефект найбільш значний в ранні терміни (одну добу), а в більш пізні терміни він знижується [7].

Л. І. Дворкін дослідив пластифіковані бетонні суміші з використанням золи ТЕС як активного мінерального наповнювача. Використання добавок суперпластифікаторів дозволило істотно збільшити ефект, який досягається за введення наповнювача, тобто дає економію цементу, підвищує міцність і поліпшує низку інших властивостей бетону.

Дослідження Л. І. Дворкіна також були пов'язані з отриманням ефективних литих бетонів із використанням зол ТЕС. Зазвичай отримання литих бетонів у виробничих умовах технологічно складніше, ніж приготування бетонів нормальної консистенції. Вони вимагають підвищеної витрати цементу, схильні до водовідділення і розшарування. Зола в складі литих бетонних сумішей із суперпластифікаторів позитивно впливає на їх життєздатність [8].

Висновки. Золошлакові суміші, золи і шлаки ТЕС можуть становити особливий інтерес для підприємств будівельної індустрії як компонент бетону. Зростаючі запаси цієї сировини змогли б значно знизити існуючий дефіцит наповнювачів бетону. Але непостійний зерновий склад золошлакових сумішей в різних місцях відвалу ускладнює їх використання як наповнювачів.

Багатокомпонентність цих сумішей і їх мінливість також ускладнюють вибір оптимального складу бетону.

Витрата цементу за використання золошлакової сировини часто була більшою, ніж у разі виготовлення бетонів тих же

характеристик на традиційних числі спрямованих на використання в заповнювачах. Як відомо, цей показник будівництві відходів промисловості. постає одним із критеріїв, за якими судять про ефективність нових розробок, у тому

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kolokhov V., Moroz L., Romin A., Kovregin V. Ash-slag waste of the coal-fired thermal power plant as a resource for the construction industry. *Materials Science Forum* this link is disabled. 2021. 1038 MSF. Pp. 290–295.
2. Lahtinen P. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads : dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki, 2001. 102 p.
3. Lahtinen P., Jyrävä H., Suni H. New methods for the renovation of gravel roads. Paper for IRF regional conference. *European Transport and Roads*. 1999. Lahti. 7 p.
4. Волженский А. В., Иванов И. А., Виноградов Б. Н. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. Москва : Стройиздат, 1984. 255 с.
5. Сергеев А. М. Теория и практика массового использования зол и шлаков тепловых электростанций в производстве бетонов : автореф. дисс...д-ра техн. наук. Ленинград, 1988. 48 с.
6. Lahtinen P. Tuhkat huotykayttoon. Kuntatekn.-kommun-tekn. *Kunnallisteknukka*. 1997. № 5. P. 52.
7. Сергеев А.М. Використання у будівництві відходів енергетичної промисловості. Київ : Будівельник, 1984. 120 с.
8. Дворкин Л. И. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их состава. Москва : Инфра-Инженерия, 2017. 432 с.

REFERENCES

1. Kolokhov V., Moroz L., Romin A. and Kovregin V. Ash-slag waste of the coal-fired thermal power plant as a resource for the construction industry. *Materials Science Forum* this link is disabled. 2021, 1038 MSF, pp. 290–295.
2. Lahtinen P. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads : Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki, 2001, 102 p.
3. Lahtinen P., Jyrävä H. and Suni H. New methods for the renovation of gravel roads. Paper for IRF Regional Conference. *European Transport and Roads*. 1999, Lahti, 7 p.
4. Volzhensky A.V., Ivanov I.A. and Vinogradov B.N. *Primeneniye zol i toplivnykh shlahkov v proizvodstve stroitel'nykh materialov* [The use of ash and fuel slag in the production of building materials]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1984, 255 p. (in Russian).
5. Sergeev A.M. *Teoriya i praktika massovogo ispol'zovaniya zol i shlahkov teplovykh `elektrostancij v proizvodstve betonov : avtoref. diss...d-ra tehn. nauk* [Theory and practice of mass use of ashes and slags of thermal power plants in the production of concrete : abstract. dis ... Dr. Sc. (Tech.)]. Leningrad, 1988, 48 p. (in Russian).
6. Lahtinen P. Tuhkat huotykayttoon. Kuntatekn. – kommun-tekn. *Kunnallisteknukka*. 1997, no. 5, p. 52.
7. Sergeev A.M. *Vikoristannya u budivnictvi vidhodiv energetichnoï promislovosti* [Use of waste from the energy industry in construction]. Kyiv : Budyvelnik Publ., 1984, 120 p. (in Ukrainian).
8. Dvorkin L.I. *Ispytaniya betonov i rastvorov. Proyektirovaniye ikh sostava* [Testing of concrete and mortar. Designing their composition]. Moscow : Infra-Engineering Publ., 2017, 432 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 21.01.2022.