

УДК 622.764.6: 66.046.59

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-24>

КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРОБКА ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ У КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ЕКОНОМІКИ

Олійник Тетяна Анатоліївна,

доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедрою збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-0315-7308

Скляр Людмила Василівна,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-2721-1436

Золошлакові відходи теплоелектростанцій є одними з найбільш масштабних техногенних утворень в Україні та становлять суттєву екологічну загрозу. Водночас вони містять цінні компоненти, які можуть бути використані як вторинна сировина. Перехід до циркулярної економіки вимагає створення ефективних технологій їх комплексної переробки. У статті розглянуто сучасні підходи до комплексної переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій як одного з ключових інструментів запровадження принципів циркулярної економіки. Актуальність дослідження зумовлена значними обсягами накопичених золошлаків в Україні, їх негативним впливом на довкілля та недостатнім рівнем залучення цінних мінеральних компонентів у господарський обіг. Золошлакові відходи Зеленодольської ТЕС розглядаються як складна багатоконпонентна техногенна система, придатна для одержання вторинного палива, залізовмісних й алюмосилікатних продуктів.

У межах дослідження вивчено речовинний, хімічний, гранулометричний і фазово-мінералогічний склад золошлаків, а також їх фізико-механічні властивості. Для розділення компонентів використано магнітну сепарацію в сильному магнітному полі, флотаційне збагачення з добором оптимальних реагентних режимів і гравітаційне розділення продуктів. Показано, що поєднання магнітної сепарації та флотації забезпечує ефективне вилучення залізовмісного продукту з масовою часткою Fe понад 40 %, вуглецевого концентрату з вилученням вуглецю більш як 90 %, а також алюмосилікатних мікросфер з унікальними функціональними властивостями. Отримані продукти можуть бути використані в металургії, енергетиці та виробництві будівельних матеріалів. Орієнтовна економічна оцінка засвідчила високу інвестиційну привабливість запропонованої технології та строк її окупності на рівні 2–3 років.

Ключові слова: золошлакові відходи, циркулярна економіка, флотація, магнітна сепарація, алюмосилікатні мікросфери, техногенна сировина.

Oliinyk Tetiana, Skliar Liudmyla. Comprehensive processing of ash and slag waste in the context of the circular economy

Ash and slag wastes from thermal power plants are among the largest technogenic formations in Ukraine and pose a significant environmental threat. At the same time, they contain valuable components that can be used as secondary raw materials. The transition to a circular economy requires the development of efficient technologies for their integrated processing. This paper examines contemporary approaches to the comprehensive processing of ash and slag wastes from thermal power plants as one of the key instruments for implementing the principles of a circular economy. The relevance of the study is determined by the substantial volumes of accumulated ash and slag in Ukraine, their adverse environmental impact, and the insufficient involvement of valuable mineral components in economic circulation. Ash and slag wastes from the Zelenodolsk Thermal Power Plant are considered as a complex, multicomponent technogenic system suitable for the production of secondary fuel, iron-bearing and aluminosilicate products.

Within the framework of the research, the material, chemical, particle-size and phase–mineralogical composition of the ash and slag, as well as their physico-mechanical properties, were investigated. Magnetic separation in a high-intensity magnetic field, flotation beneficiation with the selection of optimal reagent regimes, and gravity separation of products were employed to separate the components. It is shown that the combination of magnetic separation and flotation ensures the efficient recovery of an iron-bearing product with an Fe content exceeding 40%, a carbon concentrate with carbon recovery above 90%, and aluminosilicate microspheres possessing unique functional properties. The obtained products can be used in metallurgy, the energy sector and the production of building materials. A preliminary economic assessment has demonstrated the high investment attractiveness of the proposed technology and a payback period of approximately 2–3 years.

Key words: ash and slag waste, circular economy, flotation, magnetic separation, aluminosilicate microspheres, man-made raw materials.

Вступ. Золошлакові відходи теплоелектростанцій становлять одну з найбільш масштабних техногенних мас у структурі промислових відходів України. Їх накопичення призводить до деградації земель, забруднення підземних і поверхневих вод, утворення пилових викидів та збільшення антропогенного навантаження на довкілля. В умовах обмеженості природних ресурсів та посилення вимог екологічної безпеки особливої актуальності набувають підходи, що передбачають повторне залучення таких відходів у виробничі процеси. Теплоелектростанції формують значний потенціал вторинної сировини, який залишається недостатньо використаним через відсутність системного аналізу властивостей золошлакових матеріалів та ефективних технологій їх переробки.

Запровадження принципів циркуляційної економіки передбачає перехід від лінійної моделі «видобуток – спалювання – захоронення» до замкнених матеріальних циклів. Тому дослідження можливостей раціонального використання золошлакових відходів є актуальним напрямом, що відповідає сучасним світовим тенденціям сталого розвитку, зменшує навантаження на природні ресурси та сприяє екологічній модернізації енергетичної галузі.

Переробка твердого палива пов'язана зі значним виходом мінеральних відходів. На сьогоднішній день у відвалах теплоелектростанцій України акумульовано 358,8 млн т золошлаків на площі 3170 га. Середньорічний вихід відходів досягає 14 млн т та з огляду на погіршення якості палива має тенденцію до зростання. Відвали займають значні земельні площі і є джерелами несприятливої екологічної обстановки в регіонах. Щорічно збільшується вартість транспортування золи та шлаків ТЕС у відвали, вартість будівництва золовідвалів та їх реконструкції. Тривалий час уважалося, що мінеральні компоненти твердого палива є баластом під час його переробки, тому відходи прямували у відвали, що спричиняло зростання обсягів золостволів, спорудження яких пов'язане з відчуженням орної землі, потребує великих капітальних витрат і порушує екологічний природний баланс. Мінеральна частина золи містить переважно оксиди кремнію, алюмінію, заліза, кальцію та магнію, а також низку мікро- та рідкісних елементів. Хімічний склад золи може коливатися при спалюванні одного і того ж палива на ТЕС, проте в середньому хімічний склад протягом тривалого періоду можна вважати досить стабільним для практичного застосування.

З огляду на відносну стабільність хімічного складу та фізико-механічних властивостей,

золошлакові відходи можуть розглядатися як складна техногенна сировина, що придатна для комплексної переробки.

Проаналізувавши сучасну наукову літературу щодо переробки золошлакових відходів (далі – ЗШВ) в контексті циркулярної економіки, дійшли висновку, що всі дослідження можна умовно поділити на чотири ключові кластери.

1. Концептуальні засади та оглядові роботи.

У цьому блоці варто посилатися на роботи, які обґрунтовують необхідність переходу від лінійної моделі («видобуток – спалювання – викинуто») до циркулярної. Фундаментальний огляд авторів, який класифікує всі можливі шляхи використання золи, наголошує, що лише комплексний підхід відповідає принципам сталого розвитку [1]. Автори статті доводять, що фокус змістився з простого захоронення на використання золи як ресурсу [2]. Комплексний погляд на інтеграцію електростанцій та переробних заводів у єдиний екокластер показано в статті [3].

2. Виробництво «зелених» будівельних матеріалів та геополімерів – це найбільш досліджена сфера. Основна мета виробництва – заміна портландцементу для зниження вуглецевого сліду. Дослідники з Китаю та Австралії (наприклад, роботи в журналах *Construction and Building Materials*, *Journal of Cleaner Production*) активно вивчають використання летючої золи як прекурсора для геополімерного бетону. Основний фокус останніх 5 років – підвищення довговічності та стійкості таких матеріалів до агресивних середовищ. Так, автори доводять, що геополімерний бетон (безцементний) є більш стійким до хімічної агресії, ніж звичайний бетон, що розширює сферу його застосування [4]. Технології створення дорожніх матеріалів (склокераміки, піноскла) із відходів, що підвищує економічну привабливість переробки описано в роботі [5]. Дослідження в Європі та Сингапурі розглядають суміші на основі золи для будівельних 3D-принтерів, що дає змогу досягти безвідходного виробництва. Використання золи в сумішах для будівельних 3D-принтерів розглянуто авторами в роботі [6].

3. Вилучення критичних та рідкісноземельних металів. Огляд технологій вилучення (кислотне вилуговування, біометоди) підкреслює стратегічну важливість золи як техногенного родовища. Рідкісноземельні елементи критично важливі для електроніки та «зеленої» енергетики. Дослідження в США та Канаді зосереджені на методах кислотного вилуговування й біовилуговування (використання бактерій) для екстракції скандію, ітрію та лантанодів із золи [7]. Європейське дослідження (Польща)

оцінює потенціал золи як джерела лантанодів для промисловості ЄС [8].

4. Екологічне застосування та сільське господарство – дослідження в цьому напрямі фокусуються на ремедіації (відновленні) навколишнього середовища. Доведено кількісне зниження навантаження на довкілля при використанні золи в дорожньому будівництві [9] та порівнюється «вуглецевий слід» традиційного бетону та бетону на основі золи [10].

Про синтез високоефективних сорбентів (цеолітів) із відходів енергетики розповідають автори статті [11; 12].

Отже, аналіз попередніх досліджень зазначив, що попри значний прогрес у технологіях рециклінгу (геополімери, вилучення металів), більшість досліджень фокусуються на лабораторних експериментах. Є прогалина в дослідженнях щодо промислового масштабування цих технологій та створення замкнутих логістичних ланцюгів в умовах економік, що розвиваються.

Мета дослідження – дослідити сучасні підходи та практичні рішення щодо переробки золошлакових відходів Зеленодольської ТЕС для формування елементів циркуляційної економіки та мінімізації обсягів промислових відходів.

Завдання дослідження: вивчити речовинний та фазово-мінералогічний склад золошлакових відходів; оцінити ефективність магнітного, флотаційного та гравітаційного збагачення; розробити комплексну безвідходну технологію переробки твердих золошлакових відходів.

Методи та методики дослідження. Вивчаючи речовинний склад золошлакового матеріалу, використовували методи гравітаційного, гранулометричного, хімічного, спектрального, оптичного, термічного аналізів. Хімічний аналіз виконували за ДСТУ 10538.0-72, що передбачає визначення десяти головних компонентів: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , $\text{Fe}_{\text{зар}}$, Fe_2O_3 , SO_3 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 . Для фазово-мінералогічного аналізу необхідне попереднє концентрування мінералогічних фаз в окремих фракціях, що забезпечує більш повну діагностику складу мінералу.

Магнітну сепарацію здійснювали в сильному полі з метою вилучення залізовмісних компонентів на роликовому магнітному сепараторі 138Т-СЭМ при напруженості магнітного поля 0,5, 1,6 та 2 Тл.

Флотаційне збагачення проводили з метою отримання вуглевмісного концентрату. На першому етапі флотаційних досліджень визначали витрати реагентів та тривалості контактування суспензії зі збирачем, депресором і піноутворювачем. Дослідження проводили у флотомашині 240Фл-А з об'ємом камер 2; 1,5

та 1 л. Добір оптимального режиму флотації здійснювався у відкритому циклі.

Результати. У результаті вивчення золошлакових відходів установлено, що золошлакові відходи Зеленодольської ТЕС є багатокомпонентною гетерогенною системою, яка сформована в умовах високотемпературного спалювання вугілля та швидкого охолодження продуктів згоряння. Макроскопічно матеріал представлено рихлою масою з включеннями оплавлених та частково спечених шлакових агрегатів різної морфології (зерна мають різний розмір, шлак оплавлений, є частково спікливі пористі куски). Мікроскопічні дослідження підтвердили наявність значної кількості склоподібних фаз, що перебувають у тісному зрощенні з мінералами заліза та залишками незгорілого вуглецю. На рис. 1 візуалізовано мікроструктуру вихідної сировини (вугілля) та твердих продуктів згоряння (золошлакових відходів).

Кругла форма шлаку свідчить про те, що при спалюванні вугілля утворюється плав, який, потрапляючи у воду, призводить до утворення сферичних гранул. У топкових процесах відбувається низка перетворень, які не встигають завершитися до настання рівноважного стану. Продуктом такої незавершеної рівноваги є склоподібна фаза. Загальний вигляд різних фаз золошлакових відходів наведено на рис. 2.

Різноманітність склоподібних фаз зводиться до чотирьох видів, які відрізняються кольором та показником заломлення: А – безбарвна, В – жовта, Г – бура, Д – чорна. У цих продуктах міститься зазвичай та або інша кількість частинок незгорілого палива від одиничних продуктів до 30–40 %. При задовільному перебігу процесу та високої реакційної особливості палива їх кількість невелика. Незгоріле паливо відрізняється від вихідного й міститься у вигляді коксу та напівкоксу з малою гігроскопічністю. Перераховані фазово-мінералогічні складники є основними для золи палив.

Хімічний склад проб золошлакових відходів Зеленодольської ТЕС наведено в таблиці 1.

Результати гранулометричного аналізу золошлаків наведено в таблиці 2.

Гранулометричний аналіз (див. Табл. 2) показав, що всі класи крупності містять однакові фазово-мінералогічні компоненти, однак їх співвідношення суттєво змінюється зі зменшенням розміру частинок. У дрібних фракціях зростає вміст склоподібної фази та незгорілого вуглецю, тоді як у крупних переважають шлакові агрегати з включеннями залізистих мінералів. Така особливість зумовлює необхідність поетапного комбінованого збагачення.

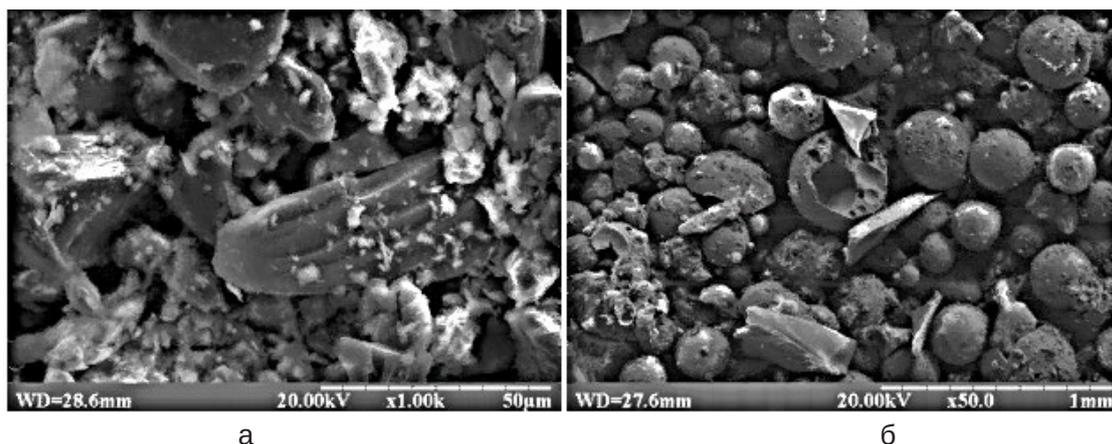


Рис. 1. Мікроструктура зошлаків: а – загальний вигляд вугілля, б – зошлак

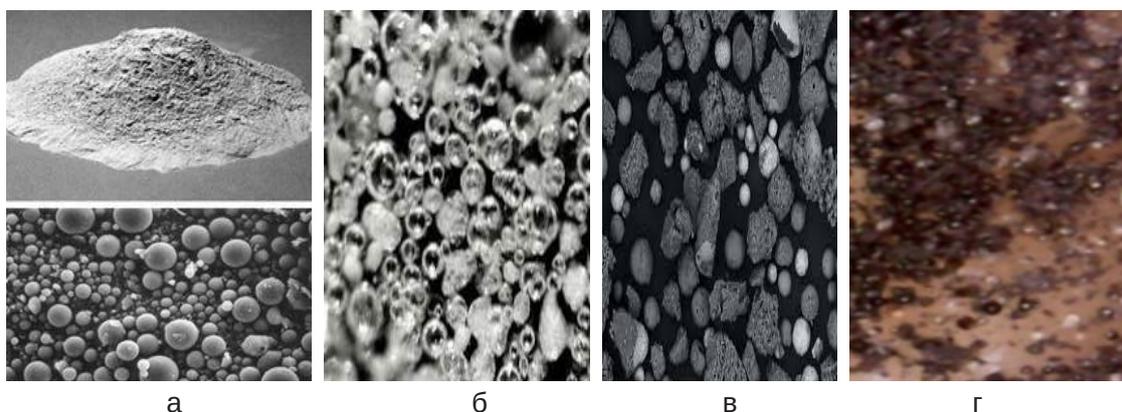


Рис. 2. Загальний вигляд різних фаз зошлакових відходів
а – склоподібна фаза; б – алюмосилікатні мікросфери; в – вугільні частинки;
г – залізовмісні частинки

Таблиця 1

Хімічний склад проб зошлакових відходів Зеленодольської ТЕС

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	MnO	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	п.п.п.
8,3	51,2	18,0	14,4	0,07	1,3	1,6	0,082	0,12	3,0	0,9	0,82	7,5

Таблиця 2

Результати гранулометричного аналізу зошлаків, %

Клас крупності, мм	Вихід, %	Фазово-мінералогічний склад, %								
		мінерали заліза	фосфати, карбонати та ін.	кульки			скло	округлі гранули	кварц тридиміт	вугілля
				чорні	безкольорові	білі матові				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
+1,0	0,4	50	–	45	5	–	–	–	–	–
–1,0– + 0,5	3,3	20	2	65	17	–	79	–	16	–
–0,5 + 0,25	20,4	–	10	33	24	10	79	–	43	1
–0,25 + 0,16	26,4	–	18	80	22	5	10	7	13	45
–0,16 + 0,07	24,1	–	27	75	50	8	5	10	12	13
–0,07 + 0,04	25,4	–	2	17	28	8	–	20	–	25
Загалом	100	0,4	3,3	14,1	21,0	5,4	18,4	9,2	6,8	21,4

Згідно з показниками заломлення, склоподібна фаза містить скло польовошпатового, кварцового й залізного складів, залізного кордієриту.

Вказане скло має близькі фізико-механічні властивості: густина – 2550–2650 кг/м³, твердість – 5–7,5, питома магнітна сприйнятливості (діаманітон) – (0,46–0,92)·10⁻⁶ см³/г.

У результаті вивчення речовинного складу золошлакового матеріалу встановлено, що розділення шлаків на мономінеральні фракції досягти неможливо. Це пояснюється специфікою золошлакового матеріалу, хімічною неоднорідністю компонентів, взаємним плавленням, наявністю пухирців газу в кульках склоподібної фази, вкрапленістю магнетиту та вугілля.

Магнітна сепарація в сильному полі дала змогу ефективно виділити залізозмісний концентрат з масовою часткою Fe понад 40 %, що відповідає вимогам до вторинної сировини для агломераційного виробництва. Так, при індукції магнітного поля 2 Тл масова частка заліза в немагнітному продукті склала 3,6 %, а в магнітному продукті – 35–42 %. Немагнітний продукт, збагачений алюмосилікатними компонентами та вуглецем, був спрямований на флотаційну доводку для отримання алюмовмісного продукту й вугільного концентрату.

Як відомо, золи теплових електростанцій, що спалюють мало реакційне вугілля, найефективніше збагачуються флотацією [13]. При цьому застосовують такі реагенти, як аполярні

та гетерополярні поверхнево-активні речовини: керосин, газойль, ААР, скипидар, Т-66 та інші вищі спирти, що сприяють переходу вуглецю до 70–80 % у пінний продукт. Тому надалі досліджено процес флотації немагнітного продукту з розробкою реагентного режиму.

Вивчали вплив відомих реагентів для флотації вугілля, легких і важких продуктів нафтопереробки, а також їх сумішей на ефективність флотації золи. Зокрема, досліджували вплив дизельного палива, дизельного й турбінного масел, суміші цих масел з керосином та іншими аполярними розчинниками. Результати досліджень представлені в табл. 3.

Аналіз даних показує, що високов'язкі продукти (дизельне масло) мають слабкі властивості збирача ($\epsilon = 23,7 \%$), мало- та середньов'язкі (керосин, дизельне паливо) дають змогу вилучити в концентрат до 65 % вуглевмісткої золи. Найбільш ефективно процес збагачення золи протікає при використанні комбінованих реагентів, які становлять суміш в'язких та малов'язких продуктів нафтопереробки ($\epsilon > 70 \%$), особливо при використанні реагенту МК ($\epsilon > 90 \%$). При флотаційному збагаченні отримано пінний та камерний продукти.

Камерний продукт флотації представлено на 60,8 % алюмосилікатними мікросферами з поверхнею, частково забрудненою вкрапленістю магнетиту, гематиту, гідроксидів заліза і вугілля.

Найвищі показники вилучення вуглецю (понад 90 %) досягнуті при використанні комбінованих

Таблиця 3

Результати флотації немагнітного продукту золошлакових відходів

Збирач	Продукт флотації	Показник збагачення, %		
		вихід	зольність	вилучення
Дизельне паливо	концентрат	26,8	40,3	54,3
	відходи	73,2	81,7	
	вихідний	100	70,6	
Дизельна олія	концентрат	15,1	53,7	23,7
	відходи	84,9	73,6	
	вихідний	100	70,6	
Суміш дизельної олії з керосином	концентрат	38,9	41,0	77,6
	відходи	61,1	89,1	
	вихідний	100	70,4	
Суміш турбінної олії з керосином	концентрат	33,6	41,9	72,6
	відходи	70,4	86,7	
	вихідний	100	73,4	
Реагент МК	концентрат	40,7	38,3	91,7
	відходи	59,3	96,2	
	вихідний	100	72,6	
Керосин	концентрат	32,4	43,7	64,7
	відходи	67,6	85,3	
	вихідний	100	71,8	

реагентів на основі продуктів нафтопереробки, що поєднують властивості малов'язких та в'язких збирачів. Отриманий вугільний концентрат із зольністю 10–15 % може бути повторно використаний у паливному циклі ТЕС, що зменшує потребу в первинному паливі.

Камерний продукт флотації містить значну кількість алюмосилікатних мікросфер, які після додаткового гравітаційного розділення поділяються за густиною.

З метою повнішого вилучення мікросфер щільністю менш ніж 1000 кг/м^3 було проведено очищення їх поверхні.

У результаті перемішування хвостів флотації в щільній суспензії (70 % твердого) поверхня мікросфер очистилася, а також частково руйнувалися агрегати, що налічують мікросфери, зцементовані глинистою речовиною і зростками вугілля з мікросферами. У результаті збільшилася кількість мікросфер та вільних вугільних зерен. При зануренні у воду очищеного продукту виділено 2,5 % легкої фракції (1,2 % від вихідного). Мінералогічним аналізом під мікроскопом встановлено, що ця фракція містить 71 % алюмосилікатних мікросфер. Решта частини представлена вугільними зернами округлими або овальними вуглисто-силікатними та гранулами з уламками мікросфер. Мікросфери порожнисті й частково заповнені, товщина оболонки переважно нерівномірна, поверхня гладка або ніздрювата. Частина порожнистих мікросфер має тонку, крихку оболонку. Рідко трапляються мікросфери з товщиною оболонки 10 % від діаметра.

Показники, хімічний склад і фізичні властивості продуктів розділення наведено в табл. 4.

При згоранні тонкоподрібнених частинок вугілля домішки оксиду алюмінію, кремнію та

інших елементів, наявних у природному вугіллі, за високої температури утворюють складні силікати, що приймають у розплавленому стані сферичну форму. Завдяки розчиненням у силікатах газам відбувається роздування сферичних мікрокрапель розплавлених.

Характеристики алюмосилікатних мікросфер наведено в табл. 5.

Сукупність унікальних властивостей мікросфер: низька густина, малі розміри, сферична форма, висока твердість і температура плавлення, хімічна інертність – зумовлюють щонайширший спектр застосувань мікросфер у сучасній промисловості.

Отримані алюмосилікатні продукти можуть бути використані як функціональні наповнювачі у виробництві легких бетонів, сухих будівельних сумішей, тампонажних розчинів та теплоізоляційних матеріалів. Абразивний продукт, сформований переважно зі склоподібних уламків, характеризується високою твердістю та може застосовуватися для струменевої обробки поверхонь або в дорожньому будівництві.

У результаті виконаних пошукових досліджень з магнітного збагачення й флотації та їх синтезу розроблена й перевірена в лабораторних умовах комплексна технологія збагачення з отриманням залізо-, вугле-, алюмовмісних продуктів (Рис. 3). У результаті дослідження технології збагачення відходів напрацьовані продукти збагачення для споживчої оцінки.

Хімічний склад і фізичні властивості продуктів збагачення золошлакових відходів наведено в табл. 6.

Запропонована комплексна технологія переробки золошлакових відходів має не лише екологічне, а й суттєве економічне значення. Зменшення обсягів відвалів дає змогу скоротити

Таблиця 4

Результати гравітаційного розділення камерного продукту флотації у водному середовищі

Найменування продукту	Вихід, %	Масова частка, %				Істина густина, кг/м^3	Насипна густина, кг/м^3
		$\text{Fe}_{\text{зар}}$	$\text{C}_{\text{орг}}$	Al_2O_3	SiO_2		
Алюмосилікатні $<1000 \text{ кг/м}^3$	2,5	4,6	5,2	22,4	64,2	830	750
Алюмосилікатні $>1000 \text{ кг/м}^3$	97,5	5,0	3,15	20,96	59,8	2150	1080

Таблиця 5

Характеристики алюмосилікатних мікросфер

Фізичні							
Розмір, мкн	Істина густина, г/см^3	Насипна густина, г/см^3	Питома вага, Н/ м^3	Твердість за Моосом	Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	Поверхнева вологість, %	
5–500	0,6–0,8	0,35–0,45	0,45–0,75	5–6	1300	0,3 max	
Хімічні, %							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2
55–65	20–28	1–6	0,2–0,6	1–2	0,2–4	0,3–2	0,5–1

витрати на транспортування, будівництво та експлуатацію золівдвалів, а також вивільнити значні земельні площі для альтернативного використання.

Отримані товарні продукти можуть бути реалізовані на внутрішньому ринку як вторинна сировина, формуючи додаткові джерела доходу для енергетичних підприємств.

З екологічного боку технологія сприяє зниженню пилових викидів, мінімізації ризиків забруднення ґрунтів і вод та скороченню вуглецевого сліду завдяки повторному використанню вуглецевмісного концентрату. Це створює

передумови для інтеграції теплоелектростанцій у регіональні індустриальні екокластери.

Порівняльну характеристику традиційного захоронення та циркулярної переробки золошлакових відходів наведено в табл. 7.

Орієнтовний строк окупності проєкту за наведеними умовними розрахунками (табл. 8) становить 2–3 роки, що свідчить про високу інвестиційну привабливість циркулярної переробки золошлакових відходів.

Так, циркулярна переробка золошлакових відходів є значно ефективнішою альтернативою традиційному захороненню як з екологічного,

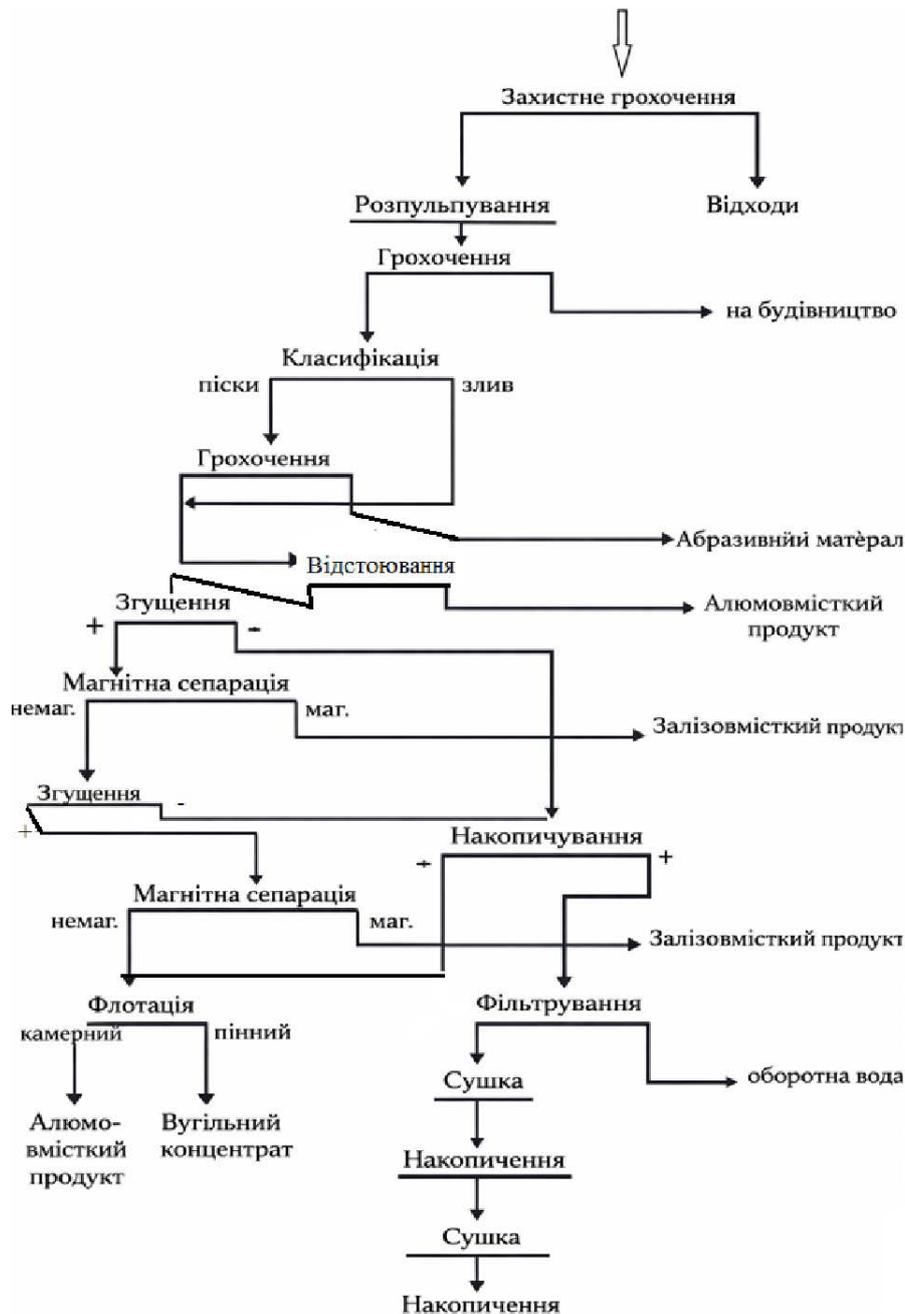


Рис. 3. Принципова технологічна схема переробки золошлакових відходів

Таблиця 6

Хімічний склад та фізичні властивості продуктів збагачення золошлакових відходів

Найменування продукту	Масова частка				Дійсна густина, кг/м ³	Насипна густина, кг/м ³	Примітки
	Fe _{заг}	C _{орг}	Al ₂ O ₃	SiO ₂			
Вугільний концентрат	1,3	85,4	1,7	5,5	1730	630	Містить 88,3 % з вугільних частинок, 8,0 % мікросфер, переважно світлих та 3,7 % зростків вугілля з мікросферами
Аюмосилікатні, густина > 1000 кг/м ³	4,6	5,2	22,4	64,2	830	750	Містить 71,0 % з різноманітних за складом і структурою мікросфер і на 29,0 % з округлих або овальних вуглисто-силікатних гранул з уламками мікросфер і частинками вугілля
Алюмосилікатні, Густина < 1000 кг/м ³	5,0	3,15	20,9	59,8	2150	1080	Містить 60,7 % мікросфер; з них 37,1 % – світлі алюмосилікатні та 23,6 % – темні і кольорові, залізисто-алюмосилікатного складу
Залізовмісний	40,6	0,9	9,6	22,5	3360	1600	Містить 60,6 % мікросфер; з них 51,7 % – темного й чорного кольору, магнетитового рідше фаялітового складу; 8,9 % – кольорові та світлі з вкрапленнями магнетиту
Залізовмісний	15,1	2,42	16,3	45,8	2620	1180	Містить більше вугільних частинок та менше мікросфер (50,5 %), велика частина яких має вкраплення магнетиту та вугілля
Абразивний	9,4	0,42	22,47	54,2	2590	1160	Містить 90,6 % склоподібних алюмосилікатних уламків, переважно залізистих, твердість за Моосом – 8,0

Таблиця 7

Порівняльна характеристика традиційного захоронення та циркулярної переробки золошлакових відходів

Критерій оцінки	Традиційне захоронення у золовідвалах	Циркулярна переробка золошлакових відходів
Напрямок використання	Відсутній, відходи виводяться з господарського обороту	Повторне залучення у виробничі цикли (енергетика, металургія, будівництво)
Вплив на довкілля	Високий: пилові викиди, забруднення ґрунтів і вод	Мінімальний: зниження викидів і скорочення площ відвалів
Землекористування	Значні площі орних земель вилучають з обігу	Вивільнення земель, можливість рекультивації
Вуглецевий слід	Підвищений через транспортування та зберігання	Знижений завдяки повторному використанню матеріалів
Економічний ефект	Витратна модель (експлуатація та обслуговування відвалів)	Доходна модель (реалізація вторинної сировини)
Ресурсна ефективність	Низька, корисні компоненти втрачаються	Висока, вилучення вуглецю, заліза та алюмосилікатів
Технологічна складність	Мінімальна	Середня, потребує збагачувального комплексу
Відповідність принципам сталого розвитку	Не відповідає	Повністю відповідає

так і з економічного боку та створює передумови для сталого розвитку енергетичної галузі.

Отримані результати узгоджуються із сучасними науковими підходами до розгляду золошлакових відходів як техногенного родовища корисних компонентів. У роботах [1–3; 16; 17]

наголошується, що перехід до циркулярної економіки в енергетиці можливий лише за умови комплексного використання всіх складників золи, що підтверджено результатами цього дослідження.

Порівняно з роботами, присвяченими використанню золи у виробництві геополімерних та

Таблиця 8

Орієнтовна економічна оцінка впровадження циркулярної переробки (умовний розрахунок)

Показник	Одиниця виміру	Значення (умовно)	Коментар
Потужність переробки ЗШВ	т/рік	300 000	Середня ТЕС
CAPEX			
Збагачувальне обладнання (сепарація, флотація)	млн грн	85–95	Одноразові капітальні витрати
Інфраструктура та монтаж	млн грн	25–30	Фундаменти, трубопроводи, електрика
Разом CAPEX	млн грн	110–125	
OPEX (річні)			
Енергоспоживання	млн грн/рік	12–15	Електроенергія
Реагенти та матеріали	млн грн/рік	8–10	Флотаційні реагенти
Персонал та обслуговування	млн грн/рік	10–12	Зарплата, ремонт
Разом OPEX	млн грн/рік	30–37	
Економічний ефект (річний)			
Реалізація вугільного концентрату	млн грн/рік	18–22	Повернення в паливний цикл
Реалізація залізвмісного продукту	млн грн/рік	20–25	Металургія
Реалізація алюмосилікатних мікросфер	млн грн/рік	25–35	Будівельні матеріали
Економія на золівдвалах	млн грн/рік	10–15	Транспорт, експлуатація
Сумарний ефект	млн грн/рік	73–97	

будівельних матеріалів [4–6; 18; 20; 21], запропонована технологія має перевагу завдяки попередньому вилученню вуглецю та заліза, що підвищує якість алюмосилікатної сировини. Це узгоджується з висновками авторів [5], які підкреслюють необхідність селективного збагачення перед глибокою переробкою.

Результати магнітної сепарації та флотації корелюють із дослідженнями [7; 8; 13–15], де зола розглядається як джерело цінних металів і мінералів. На відміну від суто хімічних методів вилуговування, механічні методи збагачення, використані в цій роботі, є менш енергоємними та екологічно безпечними.

Екологічні переваги запропонованої технології підтверджують висновки робіт [9; 10], у яких показано зниження вуглецевого сліду та антропогенного навантаження при використанні золи в будівельних і дорожніх матеріалах. Крім того, можливість синтезу та вилучення алюмосилікатних мікросфер узгоджується з результатами досліджень [11; 12], де підкреслюється їх висока функціональна цінність для промислових застосувань.

Отже, результати роботи не лише підтверджують наявні наукові положення, а й розширюють їх через розроблення комплексної технології, орієнтованої на промислове впровадження в умовах енергетичних підприємств України.

Висновки. Аналіз речовинного складу золошлакових відходів показав, що вони є складною гетерогенною техногенною системою, яка містить вугілля, склоподібні фази, магнетит та інші мінерали, що перебувають у тісному зрощенні. Установлено, що просте розділення на мономінеральні фракції неможливе без застосування комбінованих методів збагачення.

Розроблено та перевірено в лабораторних умовах ефективну комплексну безвідходну технологію переробки золошлаків з отриманням вугільного, залізвмісного, алюмосилікатного та абразивного продуктів.

Упровадження розробленої технології створює передумови для переходу енергетичних підприємств до моделі циркулярної економіки, зменшує екологічне навантаження та забезпечує економічний ефект завдяки використанню вторинної сировини.

ЛІТЕРАТУРА:

- Gollakota A. R., Volli V., Shu C. M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 672. P. 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
- Yadav V. S., Samadder S. R. A circular economy approach for valorisation of coal fly ash: A bibliometric analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2021. Vol. 23. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01144-0>
- Wang L. et al. Circular economy in coal power plants: Waste-to-resource technologies for fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 188. Art. 106692. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106692>

4. Amran M. et al. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 270. Art. 121857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>
5. Luo Y. et al. Review on the utilization of coal fly ash for the production of glass-ceramics and porous materials. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 298. Art. 126786. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126786>
6. Nematollahi B. et al. 3D printing of geopolymer based on fly ash: A review. *Biomanufacturing Reviews*. 2019. Vol. 4, No. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s40898-019-0008-4>
7. Pan J. et al. A review on recovery of rare earth elements from coal fly ash. *Waste Management*. 2020. Vol. 107. P. 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.012>
8. Franus W. et al. Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 36902–36916. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09648-0>
9. Teh S. H. et al. Potential use of coal ash in circular economy: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 172. P. 608–616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.143>
10. Goulart Ribeiro F. et al. Life cycle assessment of geopolymer concrete: A systematic review. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 64. Art. 106093. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.106093>
11. Kunecki P. et al. Synthesis of zeolites from fly ash for the removal of heavy metals from wastewater. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. Vol. 266. P. 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.048>
12. Ram L. C., Mastro R. E. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending characteristics on plant growth and toxicity. *Journal of Environmental Management*. 2014. Vol. 138. P. 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.019>
13. Глуховець М. Р., Младецький І. К. Розрахунок кількості реагенту-збирача, що подається в пульпу при флотації. *Збірник наукових праць НГУ*. 2023. № 73. С. 7–15. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.007>
14. Hlukhoveria M. et al. Beneficiation properties of ash-and-slag dumps. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2022. № 1. С. 46–50. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/046>
15. Hlukhoveria M. et al. Improving the technology of extracting coal concentrate from fly ash from thermal power plants. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2023. № 4. С. 33–39. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/033>
16. Kuźnia M. A. et al. Review of Coal Fly Ash Utilization: Environmental, Energy, and Material Assessment. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 1. Art. 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
17. Pham T.-H. Fly Ash Processing of Thermal Power Plants and Orientation of Rational Utilization By-products in the Context of Circular Economy. *Inżynieria Mineralna*. 2025. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-16>
18. Хлопицький О. О. Стан, проблеми та перспективи переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій України. *ScienceRise*. 2014. № 1(1). С. 26–31. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28511>
19. Залевська І. В., Блинний Є. В. Оцінювання токсикологічного впливу золошлакових відходів Сумської ТЕЦ на навколишнє середовище. *Науковий журнал «Метінвест Політехніки»*. Серія: Технічні науки. 2025. № 3. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-1>
20. Pavlikov A. M. et al. Ash-slag binders derived from thermal power plant wastes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. Art. 012097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012097>
21. Дерев'яно В. М. та ін. Основні напрямки досліджень із використання золи ТЕС у виробництві будівельних матеріалів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 1. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.38.831>

REFERENCES:

1. Gollakota, A. R., Volli, V., & Shu, C.-M. (2019). Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment*, 672, 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
2. Yadav, V. S., & Samadder, S. R. (2021). A circular economy approach for valorisation of coal fly ash: A bibliometric analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01144-0>
3. Wang, L., Chen, L., Tsang, D. C. W., Li, J.-S., Poon, C. S., & Wang, C. (2023). Circular economy in coal power plants: Waste-to-resource technologies for fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106692. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106692>
4. Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>

5. Luo, Y., Wu, Y., Ma, S., Zheng, S., Zhang, Y., & Chu, P. K. (2021). Review on the utilization of coal fly ash for the production of glass-ceramics and porous materials. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126786. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126786>
6. Nematollahi, B., Xia, M., & Sanjayan, J. (2019). 3D printing of geopolymer based on fly ash: A review. *Biomanufacturing Reviews*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s40898-019-0008-4>
7. Pan, J., Nie, Z., Hassas, B. V., Rezaee, M., & Zhou, C. (2020). A review on recovery of rare earth elements from coal fly ash. *Waste Management*, 107, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.012>
8. Franus, W., Wiatros-Motyka, M. M., & Wdowin, M. (2020). Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 36902–36916. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09648-0>
9. Teh, S. H., Wiedmann, T., Castel, A., & de Burgh, J. (2018). Potential use of coal ash in circular economy: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 172, 608–616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.143>
10. Goulart Ribeiro, F., & da Silva, M. G. (2023). Life cycle assessment of geopolymer concrete: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 64, 106093. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.106093>
11. Kunecki, P., Panek, R., Wdowin, M., & Franus, W. (2018). Synthesis of zeolites from fly ash for the removal of heavy metals from wastewater. *Microporous and Mesoporous Materials*, 266, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.048>
12. Ram, L. C., & Masto, R. E. (2014). Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending characteristics on plant growth and toxicity. *Journal of Environmental Management*, 138, 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.019>
13. Hlukhoveria, M. R., & Mladetskyi, I. K. (2023). Rozrakhunok kilkosti reahentu-zbyracha shcho podaietsia v pulpu pry flotatsii [Calculation of the amount of collector reagent supplied to the pulp during flotation]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, 73, 7–15. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.007> [in Ukrainian].
14. Hlukhoveria, M., Mladetskyi, I., Levchenko, K., & Borysovska, O. (2023). Improving the technology of extracting coal concentrate from fly ash from thermal power plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 33–39. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/033>
15. Hlukhoveria, M., Mladetskyi, I., Levchenko, K., & Berezniak, O. (2022). Beneficiation properties of ash-and-slag dumps. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 46–50. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/046>
16. Kuźnia, M. A., Zając, G., & Pomykała, R. (2025). Review of coal fly ash utilization: Environmental, energy, and material assessment. *Energies*, 18(1), 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
17. Pham, T.-H. (2025). Fly ash processing of thermal power plants and orientation of rational utilization by-products in the context of circular economy. *Inżynieria Mineralna*, 27(1), 123–132. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-16>
18. Khlopytskyi, O. O. (2014). Stan, problemy ta perspektyvy pererobky zoloshlakovykh vidkhodiv teploelektrostantsii Ukrainy [Status, problems and prospects of ash and slag waste processing of thermal power plants of Ukraine]. *ScienceRise*, 1(1), 26–31. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28511> [in Ukrainian].
19. Zalevska, I. V., & Blynnyi, Y. V. (2025). Otsiniuvannia toksykolohichnoho vplyvu zoloshlakovykh vidkhodiv Sumskoi TETs na navkolyshnie seredovyshe [Assessment of the toxicological impact of ash and slag waste of Sumy CHP on the environment]. *Naukovyi zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky*, (3). <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-1> [in Ukrainian].
20. Pavlikov, A. M., Harkava, O. V., & Boiko, O. V. (2019). Ash-slag binders derived from thermal power plant wastes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012097>
21. Derevianko, V. M., Kondratieva, N. V., & Hryshko, H. M. (2025). Osnovni napriamky doslidzhen iz vykorystannia zoly TES u vyrobnytstvi budivelnykh materialiv [Main directions of research on the use of TPP ash in the production of building materials]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arhitektury*, (1). <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.38.831> [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 15.12.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026