



# Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>



UDC 6628.477

## ASH AND SLAG WASTE OF THERMAL POWER PLANTS AS A PROMISING RAW MATERIAL OF THE PRESENT

Oleksii O. Khlopytskyi\*, Ihor L. Kovalenko, Liliya A. Frolova, Marharyta I. Skiba,  
Natalia P. Makarchenko

*Ukrainian State University of Chemical Technology, 8, Gagarin ave., Dnipro, 49005, Ukraine*

*Received 17 August 2023; accepted 10 October 2023; available online 25 October 2023*

### Abstract

This work considers the possibilities of complex processing of ash and slag waste of thermal power plants. The work contains technological data of acid, alkaline and fluoride processing of ash slag. The chemical composition of ash and slag waste of the Dnipropetrovsk region was established. It was established that when using acid technology of processing with mineral acids, preliminary magnetic separation is a mandatory condition. Leaching of the obtained magnetic and non-magnetic fractions is carried out at 105°C for 2 hours. At the same time, a more complete extraction is observed from the magnetic fraction. In addition, it is possible to remove liquid and scattered elements. It has been established that a wide range of sodium-based alkaline compounds can be used in alkaline processing technology. At the same time, scandium, gallium and alumina can be extracted. The process temperature is 50°C for 2 hours. It was established that for more complete processing of waste, the sintering process is carried out at 1400-1500°C. The residue from alkaline processing is used in construction. It has been established that when using the fluoride technology of ash slag processing, aluminosilicate compounds can be processed more fully due to the extraction of silicon, which makes it possible to gradually obtain aluminum and iron from the waste.

*Keywords:* power plants; waste; ash; slag; separation; extraction; secondary raw materials; acid; alkaline fluoride processing.

## ЗОЛОШЛАКОВІ ВІДХОДИ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ, ЯК ПЕРСПЕКТИВНА СИРОВИНА СУЧАСНОСТІ

Олексій О. Хлопицький\*, Ігор Л. Коваленко, Лілія А. Фролова, Маргарита І. Скиба,  
Наталія П. Макарченко

*ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр., Гагаріна 8, Дніпро, 49005, Україна*

### Анотація

У даній роботі розглянуті можливості комплексної переробки золошлакових відходів теплових електростанцій. Робота містить технологічні дані кислотної, лужної та фторидної переробок золошлаків. Встановлений хімічний склад золошлакових відходів Дніпропетровського регіону. Встановлено, що за використання кислотної технології переробки мінеральними кислотами, обов'язковою умовою є попередня магнітна сепарація. Вилуговування одержаної магнітної та немагнітної фракції проводять за 105 °С впродовж 2 годин. Повніше вилучення спостерігається з магнітної фракції. Додатково можливо вилучити рідкі та розсіяні елементи. Встановлено, що за умови лужної технології переробки можна використовувати широкий перелік лужних сполук на основі натрію. Водночас можна вилучити скандій, галій та глинозем. Температура процесу 50 °С впродовж 2 годин. Встановлено, що для більш повної переробки відходів процес спікання проводять за 1400–1500 °С. Залишок в ході лужної переробки знаходить своє застосування у будівництві. Встановлено, що за умови використання фторидної технології переробки золошлаків. Алюмосилкатні сполуки піддаються більш повній переробці завдяки вилученню кремнію, що дає можливість поступово одержати із відходів алюміній та залізо.

*Ключові слова:* електростанції; відходи; зола; шлак; розділення; вилучення; вторинна сировина; кислотна; лужна фторидна переробка.

\*Corresponding author: e-mail: [ahlopitskiy@gmail.com](mailto:ahlopitskiy@gmail.com)

© 2023 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v31i3.286130

## Вступ

Проблема комплексної утилізації золошлакових відходів (ЗШВ), що утворюються на теплоелектростанціях під час спалювання вугілля, не вирішено як загалом по Україні, так і у світі. Теплоелектростанції Дніпровського регіону працюють на вугіллі різних марок, які містять у середньому до 63 % мінеральних компонентів [1; 2]. У ході спалювання пилоподібного пального за 1200–1700 °С утворюються тверді відходи двох видів: зола виносу (летюча зола) і відвальний шлак. Приблизно 80 % мінеральної частини вугілля переходить у золу виносу, що уловлюється в циклонах і на електрофільтрах, а до 20 % переходить у шлак, який накопичується в шлакових бункерах під топкою. Потім методом гідровидалення золу і шлаки об'єднують та переміщують на золовідвали, де вони складаються і зберігаються на відкритому повітрі або під шаром води. Нині на дніпровських золовідвалах накопичилося близько 70 мільйонів тонн ЗШВ.

Масштаби накопичених ЗШВ і розміри території, зайнятої золовідвалами в Дніпропетровському регіоні, дають змогу говорити про золовідвали як про техногенні родовища, що містять сотні тисяч тонн Al, Fe, Si, а також сотні тонн рідкісних, розсіяних, рідкоземельних та благородних металів [3; 5]. Незважаючи на багаторічні науково-дослідні роботи з утилізації ЗШВ, рівень використання цих матеріалів залишається в Україні надзвичайно низьким, складаючи всього 5 %. Для порівняння зазначимо, що в Європейському союзі він доведений до 50 % (30 млн тонн на рік) [1; 3]. Переробка ЗШВ особливо важлива для Дніпропетровського регіону та країни в цілому. Проблема утилізації ЗШВ регіону та держави останніми роками постійно обговорюється, але до теперішнього часу ЗШВ майже не використовуються. Деякий час ЗШВ використовували під час будівництва доріг, але нині ця практика не має продовження.

Низький рівень використання місцевих золошлакових відходів пояснюється, зокрема, тим, що дніпровські золошлаки мають кислий характер та містять до 15 % незгорілого вугілля ("недопал"), неоднорідні та мають складний дисперсний, мінеральний і хімічний склад. Усе це ускладнює як пряме

використання золошлаку, так і отримання таких продуктів її глибокого перероблення, які б за вмістом небажаних домішок відповідали чинним ДСТУ та ТУ. Проте, запропоновані технічні рішення, що дають змогу впоратися з цим важким завданням. У цій статті будуть розглянуто способи переробки та використання золошлакових відходів.

Як відомо, питання використання золошлакових матеріалів у будівництві є однією з найбільш освоєних галузей використання золошлаку. У світовій будівельній практиці широко використовують як некласифіковані золошлаки, так і золошлаки після попереднього збагачення або поділу на складові [7–9]. Як сухий, так і вологий (з відвалів) дисперсний золошлак широко використовують для виготовлення виробів із щільних або пористих золобетонів (стінові блоки і панелі, плити покриттів і перекриттів) та пористої кераміки [8–10].

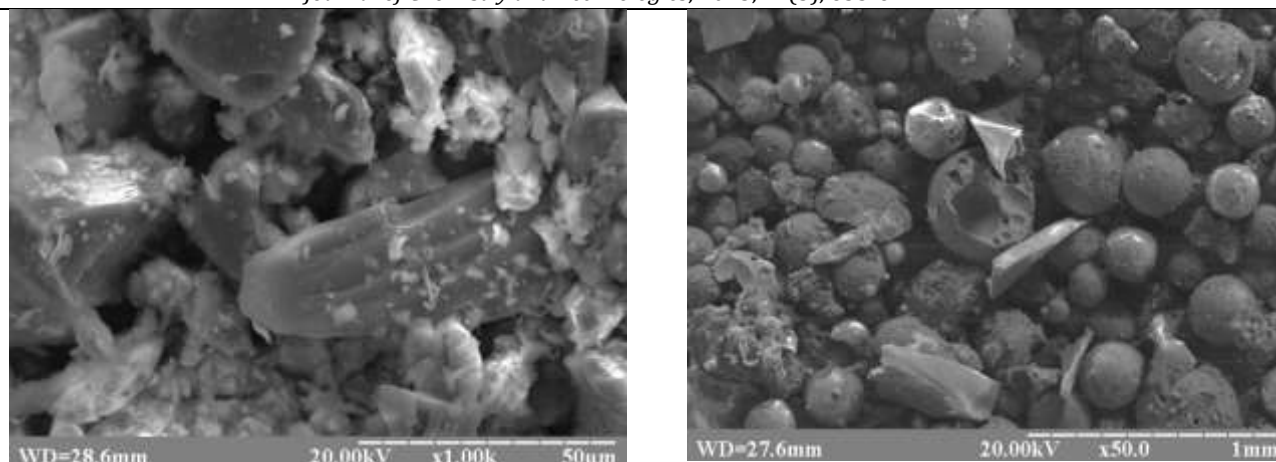
Використання золошлаків у виробництві будівельних матеріалів регулюється нормативами (ДСТУ та ТУ), які встановлюють такі показники якості, як дисперсний склад, хімічний склад, насипна щільність, наявність сторонніх включень тощо.

Алюмосилікатні мікросфери, які утворюються внаслідок розплавлення мінеральних компонентів, міграції розплаву у вигляді окремих крапель і роздування останніх за рахунок газових включень, знаходять застосування у виробництві керамічних легких теплоізоляційних матеріалів, жаростійких бетонів, термопластів, радіопрозорих керамік, поліетилену низької щільності, поліпропілену і багато чого іншого [9; 14].

*Метою роботи* є дослідження методів комплексної утилізації золошлакових відходів Дніпропетровського регіону, а саме відходів Криворізької ТЕС.

## Матеріали та методи досліджень

У роботі використовували золошлакові відходи Дніпропетровського регіону (Криворізька ТЕС), що представляють собою розсіпчастий матеріал сірувато-чорного кольору різного фракційного складу. Мікрофотографії вихідного вугілля (а) та одержаних золошлаків (б) представлені на рис. 1.



a - coal dust

b - ash and slag waste

**Fig. 1. Photomicrographs of the starting material (a - coal dust) and the generated waste (b - ash and slag waste)**  
**Рис. 1. Мікрофотографії вихідної речовини (а - пилу вугілля) та утворених відходів (б - ЗШВ)**

За хімічним складом основу золошлаку (до 95 %) складають оксиди кремнію, алюмінію і заліза (рис 1, табл. 1). Вміст оксидів лужних і лужноземельних металів у сумі становить 2.3 %. Крім основних золоутворювальних елементів, у ньому містяться ще 15 мікроелементів, вміст кожного з яких перевищує  $10^{-4}$  % (табл. 2).

Дослідження фазового та хімічного складу золошлакових відходів та одержаних рідких та твердих зразків проводили з викорис-

танням сучасних методів аналізу [11-13], наприклад, рентгенофазового аналізу (дифрактометр ДРОН-3); чистоту матеріалу визначали рентгенофлуорисцентним аналізатором («EXPERT 02L, спектрометра «Elvax») та хімічний склад досліджуваних зразків визначали методом рентгенофлуорисцентного аналізу за допомогою прецезійного аналізатора EXPERT 3L. Границя виявлення елементів за 100 с (від 12Mg до 92U) становить  $\leq 0.05$  %.

Table 1

**Chemical composition of ash slag of the Kryvyi Rih thermal power plant**

Таблиця 1

**Хімічний склад золошлаку Криворізька ТЕС**

Сполука	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	ППП
%, мас	51.5	27.4	15.65	1.17	0.49	1.49	0.42	0.32	0.52	0.17	0.57	5.1

Table 2

**The content of trace elements of ash slag**

Таблиця 2

**Вміст мікроелементів золошлаку**

Елемент	Вміст	
	%, мас	г/т
Барій	0.10	1000
Стронцій	0.042	420
Цирконій	0.033	330
Ванадій	0.014	140
Церій	0.0067	67
Галій	0.0043	43
Ітрій	0.0040	40
Срібло	0.0011	11
Золото	0.0005	5
Лантаніди	0.0055	55

### Результати та їх обговорення

Наші дослідження були зосереджені на аналізі хімічного складу золошлакових відходів та їх подальшій переробці декількома методами.

З аналізу мікрофотографій (рис. 1а) можна зробити висновок, що сферична форма золошлаків свідчить про те, що в ході спалювання вугілля утворюється плав, який, потрапляючи у воду, приводить до утворення сферичних гранул. Сяючі гранули на

мікрофотографії свідчать про наявність магнітної фракції [1; 11].

Після природного спливання порожнистих мікросфер на поверхню ставка їх збирають. Щорічно на найбільших теплоелектростанціях України утворюється кілька десятків тисяч тонн алюмосилікатних мікросфер, які могли б використовуватися для одержання високоякісних композиційних матеріалів.

Магнітна фракція (магнітні мікросфери) представляє собою глобули розміром від 5 до 300 мкм. Вміст магнітних мікросфер у золошлаках становить 3.3–26 % [3; 4]. До утворення магнітних мікросфер призводить наявність у вихідному вугіллі легкоплавких залістистих карбонатів. Основним компонентом у всіх магнітних мікросферах є залізо, вміст якого в перерахунку на  $Fe_2O_3$  може досягати 88 %, тобто феросфери є головним концентратом заліза у складі золошлаків. У складі феросфер переважає магнетит з домішками феритів магнію, марганцю, кальцію. Є склофаза, розташована між гілками рудних дендритів, яка містить оксиди кремнію (18–38 %) і оксиди алюмінію (1–12 %), решта – домішки. Кількість феросфер у золі виносу на 1–2 порядки перевищує кількість силікатних порожнистих мікросфер, на кожній ТЕС ресурси феросфер становлять десятки і навіть сотні тисяч тонн на рік [3–5]. Галузь застосування магнітних мікросфер досить широка: від використання в якості специфічного залізорудного концентрату в металургійних процесах до ефективного застосування в якості каталізаторів в технології зв'язаного азоту [15–17].

Для виділення магнітних мікросфер із золи можна використовувати методи сухої та мокрої магнітної сепарації. Так, у роботі [3] методом сухої магнітної сепарації із золи були виділені магнітні концентрати з виходом близько 30 %.

Схема розділення охоплює такі стадії: гранулометрична концентрація, гідродинамічний поділ, суха магнітна сепарація важких продуктів гідродинамічного поділу за напруженості магнітного поля 0.3 Тл. Така схема дає змогу отримувати магнітні концентрати високої чистоти і постійного складу.

Ще одним важливим компонентом золошлаків є незгорілі частинки вугілля («недопал») становлять від 5 до 15 % золи. Під час поділу золи на фракції незгоріле вугілля концентрується у фракції 100–200 мкм [3; 7]. Недопал відрізняється від

вихідного вугілля і являє собою частинки коксу або напівкоксу [3]. Незгорілі частинки доцільно витягувати із золи, оскільки вони є шкідливою складовою, що знижує якість будівельних матеріалів. У роботах [3; 7] було досліджено вугільну фракцію золошлаку від спалювання кам'яного вугілля. Встановлено, що вугільні частинки містять від 33 до 58 % мінеральної частини, мають високу пористість і досить розвинену питому поверхню – 91–155 м<sup>2</sup>/г. Це дає змогу використовувати їх як вуглецево-мінеральні сорбенти у очищенні води [14; 17] та відходящих газів від забруднень [17]. Недопал можна виділити із золи методом флотації.

Найбільшу потенційну цінність становлять розсіяні – Ga, V, тугоплавкі – Ti, Zr, рідкоземельні – ітрій та лантаніди та благородні – Au, Ag. [13; 18; 19]

Фазовий склад золошлаку – важливий фактор, що впливає на ефективність вилуговування елементів. Рентгенофазовий аналіз, проведений на установці Дрон-3 (лінії  $K\alpha, \beta$ -фільтр), засвідчив наявність у золошлаці антрацитового вугілля аморфної фази,  $\alpha$ -кварцу, алюмосилікатів типу силімагніту  $Al_2O_3 \times SiO_2$  або муліту  $3Al_2O_3 \times 2SiO_2$ . Були досліджені основні закономірності вилучення кремнію й алюмінію під час гідролужної обробки (така обробка дає змогу повністю виділити аморфну фазу [11]). Дифрактограма отриманого залишку показує посилення сигналу  $\alpha$ -кварцу і відсутність аморфної фази. Виділення аморфної фази вели за таких оптимальних умов:  $t = 85^\circ C$ ,  $\tau = 2,5$  год,  $C_{л} = 200$  г/л,  $T:P = 1:5$ . Ступінь вилучення кремнію в цих умовах становив 47 % (у перерахунку на  $SiO_2$ ), а алюмінію – 10.5 % (у перерахунку на  $Al_2O_3$ ). З урахуванням отриманих даних склад аморфної фази можна представити як  $9SiO_2 \times 2Al_2O_3$ .

Подальші дослідження були зосереджені на різних методах переробки золошлакових відходів та їх порівняння.

Найбільш простим вважається кислотний метод переробки, у якому з метою вилучення мікроелементів основного та амфотерного характеру використовують розчини мінеральних кислот ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $HNO_3$ ). Кислотне вилуговування поєднують із попередньою магнітною сепарацією. А саме, золошлак піддають класифікації, потім дрібну фракцію (< 1 мм) розділяють магнітною сепарацією на магнітну і немагнітну фракції, а вилуговування кожної фракції здійснюють соляною кислотою (6 М) протягом 2 год. за

температури 105 °С і густини пульпи 40 % [11; 16]. Більш повно метали вилучаються із магнітної фракції.

Наприклад, скандій та ітрій можна вилучати солянокислими розчинами. Встановлено, що оптимальними умовами вилуговування скандію та ітрію є: температура 40–50 °С, вихідна концентрація соляної кислоти – 2.5–3.2 моль/л, відношення Т : Р = 1 : 4–1 : 5, тривалість процесу 30–60 хв. За цих умов в розчин переходить 95–96 % ітрію і 85–90 % скандію.

Використання лужних методів переробки має свої особливості, а саме, для вилучення мікроелементів кислотного й амфотерного характеру у відходах, які містять велику кількість діоксиду кремнію, можна використовувати різні лужні розчини (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>OH) [11; 20]. Це дає можливість вилучати дорогий метал скандій із проміжних продуктів переробки бокситів на глинозем [12]. Вилуговування ведуть 5–12 %-им розчином карбонату або гідрокарбонату натрію, обробку повторюють щонайменше тричі за співвідношення Т : Р = 1 : 2.5–5.0, температурі до 50 °С і часі обробки щонайменше 2 години. В отриманий розчин вводять гідроксид амфотерного металу-колектора (розчин оксиду алюмінія або оксиду цинку в гідроксиді натрію), потім осад фільтрують, промивають, сушать і прожарюють. Вміст оксиду скандію в продукті становить 26–27 %. Оптимальні умови: t = 85±5 °С, τ = 1 год, Сл = 200–250 г/л, Т : Р = 1 : 4–6, ступінь вилучення кремнію (у розрахунку на SiO<sub>2</sub>) становить 49.3 %, алюмінію – 5.5 %, галію – 56 %.

Отриманий розчин вилуговування характеризується такими показниками: SiO<sub>2</sub> – 60 г/л, Ga – 5 мг/л. Для подальшого вилучення галію можна використовувати відомі схеми, що включають екстракцію або іонний обмін. Практично весь галій може бути вилучений із золошлаку за три стадії вилуговування. Аморфний діоксид кремнію може бути виділений з розчину і використаний як сировина для хімічної промисловості, наприклад, для отримання силікатної матриці каталізаторів, лакофарбових матеріалів, білої сажі.

Зазначимо, що лужний метод переробки золошлаку так само, як і кислотний, призводить до утворення нерозкладеного залишку переробки, який рекомендується

використовувати в будівництві після відповідної класифікації та підготовки [21].

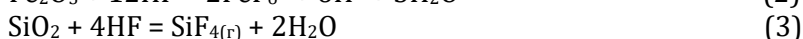
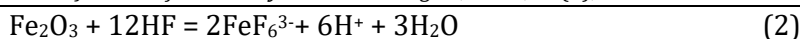
Найповніше можливо переробити золошлак на продукти способом спікання його з карбонатом натрію в електропечах за температури 1400–1500 °С [12; 20]. Охолоджений плав піддається водному вилуговуванню, що веде до вилучення силікатів натрію і калію. Більш детально стадії вилуговування по даному методу описані у роботі [20]. Отриманий розчин надходить на переділи виробництва білої сажі, а кек – на лужне вилуговування алюмінію з отриманням концентрату рідкісних металів. Даний метод переробки золошлаку – спіканням його з содою – дає змогу повною мірою переробити золошлак й одержати низку цінних продуктів: глинозем, концентрат рідкісноземельних елементів тощо, але є дорогавартісним і потребує великих капітальних та енергетичних витрат.

Одним із перспективних методів майже повної переробки золошлаку є фторидний метод. Наявність α-кварцу і муліту у золошлаку робить малоефективними кислотні та лужні методи через стійкість цих фаз до хімічної дії. Застосування фторидної технології дає можливість подолати ці труднощі, оскільки фторвмісні сполуки мають високу реакційну здатність. Відомо кілька фтористих сполук, які можуть бути використані для переробки золошлаків. Такими речовинами є фторид кальцію, фторид амонію, фтористоводнева кислота і гексафторсилікат натрію. Мета фторидної переробки золошлаку полягає в тому, що фтороводень взаємодіє із золошлаком та переводить кремній, що міститься у відходах, в газообмінну сполуку – тетрафторсилан. Водночас відбувається відділення сполук кремнію від основної маси речовин, що містяться в золошлаку [22]. Тетрафторсилан виглинають розчином фториду амонію, потім розчин обробляють надлишком амоніаку для виділення високодисперсного діоксиду кремнію. Із залишку переробки після фторидної обробки отримують низку важливих продуктів.

Розглянемо фторидний спосіб переробки золи більш детально.

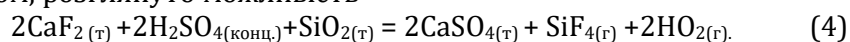
Отримання SiF<sub>4</sub> у фторуванні золошлаку. У процесі обробки розчинами фтористоводневої кислоти процес розчинення золошлаку можна представити такими реакціями:





Найповніше кремній переходить у газову фазу (у вигляді  $\text{SiF}_4$ ) за таких умов обробки:  $t = 25^\circ\text{C}$ , дворазовий надлишок  $\text{HF}$ , концентрація  $\text{HF}$  – 45 %. Ступінь вилучення кремнію становить 34 %, чого явно недостатньо.

Оскільки фторидна кислота є надзвичайно токсичним реагентом, розглянуто можливість



Найбільш повне вилучення кремнію досягається в умовах надлишку фториду кальцію (1 : 1.5) і сульфатної кислоти (1 : 4) за  $250^\circ\text{C}$ . Для повного протікання реакції потрібно 40 хвилин. За цих умов ступінь вилучення кремнію досягає 97 %. За умови використання  $\text{CaF}_2$  утворюється велика кількість гіпсу, який може бути використаний у будівництві.

З погляду раціональної організації фторидної переробки та створення замкнутого технологічного циклу фторид амонію має переваги порівняно з  $\text{CaF}_2$  [22]. Після нагрівання реакційного середовища протягом 1.5 год. надлишок фтору видаляється із зони реакції.

За  $t = 250^\circ\text{C}$ , надлишку  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1 : 3) і  $\text{NH}_4\text{F}$  (1 : 1.2) ступінь вилучення кремнію становить 96.3 %. Після видалення кремнію алюміній і залізо виділяють у формі сульфатів [20; 22]. Попередньо надлишок фтору з реакційного середовища видаляють, нагріваючи реакційну суміш за  $250^\circ\text{C}$  протягом 1.5 год.

## Висновки та перспективи досліджень

З нашої точки зору, з розглянутих методів переробки золошлаку кожен метод має свої

фторування золошлаку фтористим воднем, що виділяється під час реакції  $\text{CaF}_2$  і  $\text{H}_2\text{SO}_4$  безпосередньо в зоні реакції.

Отримання тетрафторсилану в ході обробки золи сумішшю  $\text{CaF}_2$  та  $\text{H}_2\text{SO}_4$  може бути представлено реакцією (4):

переваги та недоліки. Але найбільш перспективний – фторидний метод. Він дає змогу якнайповніше переробити відходи й отримати цілу низку цінних продуктів, що користуються високим попитом у промисловості [23; 24].

Такими продуктами є біла сажа (застосовується у виробництві автомобільних і авіаційних шин), кріоліт (сировина для отримання алюмінію) і концентрат рідкісноземельних елементів. Останній може бути перероблений з отриманням дорогих ітрію, гаюлю, скандію і церію, необхідних у радіоелектроніці та приладобудуванні. Великою перевагою фторидної технології є й те, що вона дає можливість переробити золошлак без утворення нових відходів, що відповідає сучасним екологічним вимогам, які висуваються до утилізаційних технологій [25].

Одним із мінусів фторидної технології є особливості використання фторидних сполук та відповідного устаткування.

Як перспектива, планується поєднання цих методів з метою комплексного підходу до різного роду золошлакових відходів.

## References

- [1] Khlopytskyi, A.A., Makarchenko, N.P. (2013). Prospects of development of processing solid slag wastes from thermal power plants in to finished products. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, 3(42), 91–93. <http://pratsi.opu.ua/articles/show/1004>
- [2] Myazin, V.P., Shumilova, L.V., Razmakhnin, K. K., Bogidaev, S. A. (2018). Integrated Processing of Ash and Slag from Thermal Power Plants in Eastern Transbaikalia. *J. Min. Sci*, 54, 845–857. <https://doi.org/10.1134/S1062739118054975>
- [3] Hlopitskiy, A.A., Savenkov, A.S., Picenok, I.V. (2016). Ashes and slag waste as secondary raw materials in producing nanomaterials. *NANOTECHNOLOGY and NANOMATERIALS NANO-2016*, 4.
- [4] Kierczak, J., Chudy, K. (2014). Mineralogical, Chemical, and Leaching Characteristics of Coal Combustion Bottom Ash from a Power Plant Located in Northern Poland. *Pol. J. Environ. Stud.*, 23(5), 1627–1635.
- [5] Ryabov, Y.V., Delitsyn, L.M., Ezhova, N.N., Sudareva, S. V. (2019). Methods for Beneficiation of Ash and Slag Waste from Coal-Fired Thermal Power Plants and Ways for Their Commercial Use (a Review). *Therm. Eng.* 66, 149–168. <https://doi.org/10.1134/S0040601519030054>
- [6] Guojing, W., Min, G., Xiaohui, F., Zhiyun, Ji., Xuling, Ch., Zhuangzhuang, W. (2021). Co-disposal of municipal solid waste incineration fly ash and bottom slag: A novel method of low temperature melting treatment. *Journal of Hazardous Materials, Volume 408*, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124438>
- [7] Behera, S.K., Mishra, D.P., Prashant, S.K., Mishra, S.K., Mandal, C.N., Ghosh, R.K., Phanil, K.M. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: *Review and future perspective*,



- Construction and Building Materials*, 309.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125120>
- [8] Yatsenko, E.A., Goltsman, B.M., Trofimov, S.V., Lazorenko, G.I. (2022). Processing of Ash and Slag Waste from Coal Fuel Combustion at CHPPs in the Arctic Zone of Russia with Obtaining Porous Geopolymer Materials. *Therm. Eng.*, 69, 615–623.  
<https://doi.org/10.1134/S0040601522070102>
- [9] Shchukina, L.P., Galushka, Ya.O., Khlopytskyi, A.A., Savenkov, A.S. (2020). Prospects of the application of coal ash materials to produce construction heat-insulation ceramics. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.*, 4, 215–224, DOI: [10.32434/0321-4095-2020-130-3-215-224](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-130-3-215-224)
- [10] Tong, Zh., Siqi, Zh., Huifen, Ya., Wen, Ni., Jia, Li., Ge, Zh., Guoxiang, T., Xuan, Li., Song, G., Yichen, Zh., Zeping, Wu. (2023). Leaching and hydrating mechanisms, economic benefits of backfill materials by using coal fly ash-slag-based binder for environmentally sustainable production. *Construction and Building Materials*, 397.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132360>
- [11] Khlopytskyi, A.A. (2015). Study of Complex Recovery of Solid Slag Waste from Thermal Power Plants in the Target Components. *Chemical and Materials Engineering.*, 3(1), 1–5. doi: [10.13189/cme.2015.030101](https://doi.org/10.13189/cme.2015.030101)
- [12] Shemi, A., Ndlovu, S., Sibanda, V., Van Dyk, L.D. (2014). Extraction of aluminium from coal fly ash: Identification and optimization of influential factors using statistical design of experiments. *International Journal of Mineral Processing*, 127, 10–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.12.003>
- [13] Cherkasova, T.G., Cherkasova, E.V., Tikhomirova, A.V., Gilyazidinova, N.V., Klyuev, R.V., Martyushev, N.V., Karlina, A.I., Skiba V.Yu. (2022). Study of Matrix and Rare Elements in Ash and Slag Waste of a Thermal Power Plant Concerning the Possibility of their Extraction. *Metallurgist* 65, 1324–1330.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-022-01278-2>
- [14] Frolova, L.A., Pivovarov, A.A., Butyrina, T.E., Tsepich, E.G. (2015). Purification of wastewaters, containing chromium, by a sorbent based on blast furnace slag. *J. Water Chem. Technol.*, 4(37), 185–190. doi: [10.3103/S1063455X15040062](https://doi.org/10.3103/S1063455X15040062)
- [15] Fan, M., Brown, R., Wheelock, Th., Cooper, A., Nomura, M., Zhuang, Y. (2005). Production of a complex coagulant from fly ash. *Chemical Engineering Journal*, 106, 269–277.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.12.044>
- [16] Khlopytskyi, A., Savenkov, A., Bliznjuk, O., Skiba, M., Vorobiova, V., Masalitina, N. (2022). Leaching of FeO and CaO by nitric acid from ash-slag wastes of thermal power plants. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.*, 1, 95–99. DOI: [10.32434/0321-4095-2022-140-1-95-99](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-95-99)
- [17] Bliznjuk, O.N., Masalitina, N.Yu., Savenkov, A.S., Suvorin, A.V., Khlopytskyi, A.A. (2019). Synthesis of a multioxide catalyst for the oxidation of ammonia to nitrogen(II) oxide. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.*, 3, 98–118. doi: [10.32434/0321-4095-2019-124-3-98-108](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-98-108)
- [18] Yatsenko, E.A., Goltsman, B.M., Parshukov, V.I., (2022). Analysis of suitability of TPP ash-slag waste as materials for hydrogen fuel storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(6), 3906–3917.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.272>
- [19] Snegirev, V.A., Sabirova, T.M. (2021). State-of-the-Art and Problems of Bioleaching of Metals from Ash-and-Slag, *Wastes. Metallurgist* 65, 794–807.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-021-01217-7>
- [20] Khlopytskyi, O., Vereshchak, V., Nosov, K., Fedotovskiy, A., Makarchenko, N. (2013) [Alkaline method of opening zircon]. *Chemical industry of Ukraine.*, 3, 43–48. (in Ukrainian).
- [21] Dosmukhamedov, N.K., Zholdasbay, E.E. (2022). Technology of Ash and Slag Waste Processing by Chloridizing Roasting. *Metallurgist*, 66, 180–189.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-022-01315-0>
- [22] Tripathy, A., Behera, B., Aishvarya, V., Sheik, A. (2019). Sodium fluoride assisted acid leaching of coal fly ash for the extraction of alumina. *Minerals Engineering*, 131, 140–145.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.019>
- [23] Zbigniew, G. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 124.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>
- [24] Suvorova, O.V., Makarov, D.V. (2019). Foam Glass and Foam Materials Based on Ash-Slag Wastes from Thermal Power Plants (Review). *Glass Ceram* 76, 188–193. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00162-x>
- [25] Frolova, L.A., Pivovarov, A.A. (2016). Obtaining of brown pigments from concentrated waste water containing nickel. *Chem.Chem.Technol.*, 10(2). 209–211. doi: [10.23939/chcht10.02.209](https://doi.org/10.23939/chcht10.02.209)