

УДК 6628.477

*Н. Климова, О. Хлопицький, І. Коваленко, Н. Макаrenchенко***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИЛУЧЕННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

У роботі досліджені закономірності вилучення рідкісноземельних елементів (РЗЕ) з відходів теплових електростанцій за допомогою процесів спікання. Метою дослідження було встановлення оптимальних параметрів проведення процесу: складу флюсу, співвідношення спікаючого флюсу до відходів і температури спікання. Показано, що зміна типу реагенту спікання, його співвідношення з відходами та температура процесу мають суттєвий вплив на ступінь вилучення РЗЕ із нерозчинної форми золошлаку у розчинну форму спіку. Визначені оптимальні температури спікання (300–450°C) для вилучення РЗЕ із золошлакових відходів. Досліджено вплив різних спікаючих реагентів на процес вилучення РЗЕ із золошлакових відходів. Показано, що застосування натрій гідроксиду як спікаючого реагенту дозволяє збільшити ступінь вилучення РЗЕ з відходів до 100%. На підставі аналізу отриманих експериментальних даних визначені основні технологічні параметри вилучення РЗЕ у спік.

**Ключові слова:** відходи, золошлак, рідкісноземельні елементи, розділення, вилучення, вторинна сировина, спікання.

**DOI:** 10.32434/0321-4095-2024-153-2-26-31**Вступ**

Поступовий перехід від традиційних джерел енергії до альтернативних екологічно чистих джерел енергії, таких як сонячні батареї, електромобілі і енергія вітру тощо, приводить до швидкого зростання попиту на таку критично важливу сировину, як рідкісноземельні елементи (РЗЕ). Доступність і ціна РЗЕ мають вирішальне значення для виробництва широкого спектра високотехнологічних продуктів, пристроїв і технологій, які широко використовуються в медичній, оборонній, аерокосмічній та автомобільній промисловостях.

У звіті групи Європейської Комісії з постачання сировинних матеріалів певні групи матеріалів визначені як критичні (коли ризики нестачі поставок і їх вплив на економіку вищі у порівнянні з більшістю інших видів сировини<sup>1</sup>). Проаналізувавши 41 вид металів і мінералів з

точки зору політико-економічної стабільності країни-виробника, їх географічної концентрації, потенціалу заміщення і ступеня перероблення, було складено список із 14 видів сировини, які визначено як критичні. Рідкісноземельні елементи, до яких відносяться ітрій, скандій, лантан і так звані лантаноїди (церій, празеодим, неодим, прометій, самарій, європій, гадоліній, тербій, диспрозій, гольмій, ербій, тулій, ітербій і лютецій, були внесені до цього списку. Згідно з прогнозом попит на РЗЕ збільшиться протягом наступного десятиріччя в основному за рахунок споживання у «чистих технологіях». Тому питання пошуку альтернативних джерел видобутку РЗЕ є надзвичайно актуальним.

Вугільні теплові електростанції (ТЕС) є одним з найбільших джерел електроенергії, на їх частку припадає близько 38% всієї електроенергії, що виробляється в усьому світі і 32,0% – в Ук-

<sup>1</sup> Report lists 14 critical mineral raw materials. Available from: <https://cutt.ly/0hTHzZW>.

© Н. Климова, О. Хлопицький, І. Коваленко, Н. Макаrenchенко, 2024



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*N. Klymova, O. Khlopytskyi, I. Kovalenko, N. Makarchenko*

раїні. Це пов'язано з тим, що вугілля є найбільш поширеним викопним паливом, і воно є порівняно дешевшим, ніж інші види палива, такі як нафта і природний газ. Однак збільшення використання вугілля на електростанціях призводить до утворення величезної кількості відходів, відомих як золошлакові відходи (ЗШВ).

Дослідження [1,2] показали, що зольний пил і тверді відходи, які утворюються на теплових електростанціях, багаті на РЗЕ. Втім більшість ЗШВ знаходиться в малоприслатному для використання стані, і ці вторинні ресурси використовуються не повною мірою або взагалі не використовуються. Перероблення ЗШВ з метою вилучення РЗЕ може не тільки стати додатковим джерелом цінної сировини, але й дозволить зменшити тиск на довкілля, спричинений утворенням і накопиченням відходів ТЕС.

Статистичні дані<sup>2</sup> про роботу ТЕС свідчать, що на 1 кВт встановленої потужності щороку утворюється в середньому 500 кг ЗШВ. В даний час у відвалах теплоелектростанцій України накопичено 358,8 млн.т ЗШВ на площі 3170 га. Середньорічний вихід шлаків досягає 14 млн.т., що дає змогу вилучати з них не тільки РЗЕ а й інші елементи конструкційного призначення [3–5].

Середній сумарний вміст РЗЕ в світових вугіллях, відповідно до розрахункової середньої концентрації індивідуальних лантаноїдів та ітрію (Y), оцінюється в 68,5 ppm [3,6], що приблизно в 2,5 рази нижче, ніж у породах верхньої континентальної кори (168,4 ppm [6,7]). Таким чином, середній вміст РЗЕ у вугільній золі можна співвіднести з вмістом РЗЕ в деяких традиційних рудах, тобто відходи від спалювання вугілля можуть і повинні розглядатися як можливі вторинні сировинні джерела цих металів.

Для повного оцінювання перспективності будь-якої сировини РЗЕ (включаючи золошлакові відходи ТЕС) слід враховувати цілу низку взаємопов'язаних чинників: ресурси цих металів, можливість збагачення, простота і ступінь гідрометалургійного вилучення, рівень радіоактивності (що може вплинути на навколишнє середовище і здоров'я людини під час видобутку і перероблення) тощо. Однак для попереднього оцінювання цінності сировини достатніми є дані про вміст РЗЕ і їх індивідуальний склад.

Вміст РЗЕ в золошлакових відходах від спалювання вугілля в діапазоні концентрацій 800–900 ppm вважається пороговим значенням для

доцільного вилучення РЗЕ з вугілля [8]. Однак Кетріс і співавтори [8] оцінили відношення вмісту РЗЕ у вугіллі до золошлакових відходів близько 0,17. Таким чином, пороговий вміст РЗЕ у вугіллі становить 115–130 ppm, що вказує на те, що вугілля багатьох родовищ може бути потенційними сировинними ресурсами, придатними для вилучення РЗЕ [6–8].

Враховуючи зростаючий попит на РЗЕ і обмежені запаси відповідної сировини, вилучення РЗЕ з вторинних джерел, таких як продукти згорання вугілля має стратегічне значення. Багато науково-дослідних організацій на даний час досліджують процеси відновлення рідкоземельних елементів з відходів спалювання вугілля, узагальнено кілька методів вилучення та відділення індивідуальних РЗЕ з золошлакових відходів, що включають фізичні і хімічні процеси. Такі процеси зазвичай починаються з розчинення рідкоземельних елементів з використанням кислоти в якості вилуговуючого агента з подальшим відділенням небажаних мінеральних домішок фільтрацією і осадженням шляхом екстракції розчинником, з подальшим вилученням РЗЕ за допомогою гідрометалургії. Однак унікальна подібність хімічної поведінки сполук РЗЕ робить процес їх вилучення та розділення досить складним.

Оскільки основна частка рідкісноземельних елементів в золошлакових відходах знаходиться у так званому «каркасі» на основі алюмосилікатів, а не адсорбована на поверхні частинок відходів, що значно полегшило б їх вилучення, то ефективність вилучення РЗЕ безпосередньо залежить від методу руйнування склоподібної матриці частинок.

Таким чином, процес вилучення РЗЕ із золошлакових відходів умовно можна розділити на основні етапи: спікання ЗШВ (руйнування склоподібної матриці), вилуговування спіку (переведення сполук РЗЕ у розчин) та вилучення РЗЕ із водних розчинів.

При виборі технологічних параметрів процесів спікання центральним питанням є кількість компонентів, які переходять з нерозчинної форми сполук, які знаходяться у золошлакових відходах у розчинну, а саме у спік, який в подальшому можна піддавати вилуговуванню.

Метою дослідження є встановлення оптимальних параметрів проведення процесу: склад флюсу, співвідношення спікаючого флюсу: ЗШВ та температури спікання.

<sup>2</sup> Electricity generation and consumption in January–August 2020. [Internet]. [cited 2020 September 11]. Available from: <https://kosatka.media/category/elektroenergiya/analytics/generaciya-i-potreblenie-elektroenergii-v-yanvare-avguste-2020-goda>.

### Методика експерименту

В роботі використовували золошлакові відходи Дніпропетровського регіону (Криворізька ТЕС, золовідвал № 1), що представляють собою розсипчастий матеріал сірвато-чорного кольору різного фракційного складу. Хімічний склад відходів та вміст мікроелементів представлені відповідно у табл. 1 та 2.

Методика досліджень полягала у наступному: наважку золошлаку 20 г (500 мкм) змішували у співвідношенні флюс:зола шлак=5:1 з лужним флюсом різної природи ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{CaO}$  та  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) і ретельно перемішували до однорідності. Суміш кількісно переносили до корундових тиглів і піддавали спіканню в муфельній печі в інтервалі температур 150–450°C. Після цього продукт плавлення (спікання) подрібнювали до розміру не менше 100 мкм і вилуговували розчином соляної кислоти за таких умов: температура 60°C, концентрація соляної кислоти 2 М, співвідношення спік:соляна кислота=1:3, тривалість 60 хв. Розчин після вилуговування розбавляли до об'єму 1 л, а потім відбирали пробу для визначення кількості вилученого РЗЕ методом рентгенофлуоресцентного аналізу.

Дослідження фазового та хімічного складу золошлакових відходів та одержаних рідких і твердих зразків проводили з використанням наступних методів аналізу [9–11]: рентгенофазовий аналіз (дифрактометр ДРОН-3), чистоту матеріалу визначали рентгенофлуоресцентним аналізатором («EXPERT 02L, спектрометр «Elvax»), хімічний склад досліджуваних зразків визначали методом рентгенофлуоресцентного аналізу за допомогою прецизійного аналізатора EXPERT 3L. Межа чутливості виявлення елементів за 100 с (від 12Mg до 92U) становить  $\leq 0.05\%$ . Для оформлення результатів досліджень використовували програмний комплекс «OriginPro 8.5 SR1».

### Результати та їх обговорення

Аналіз одержаних результатів виконували відповідно до стадій, які представлені в експериментальній частині. З метою встановлення оптимальних параметрів та впливу природи флюсів на результати спікання золошлакових відходів використовували наступні реагенти (флюси):  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{CaO}$  та  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Ефективність вилучення (%) РЗЕ оцінювали за ступенем вилу-

чення ітрію (Y).

Зразки спікались 30 хвилин при температурі 450°C відношення флюс:зола шлак=5:1, після чого проводилось вилуговування соляною кислотою. З рис. 1 видно, що найбільш ефективними спікаючими агентами виявились  $\text{Na}_2\text{O}_2$  і  $\text{NaOH}$ .

З метою подальшого визначення впливу співвідношення флюс:золашлак були проведені досліди зі зміною масового співвідношення з 5:1 до 1:1 та температури спікання 450°C.

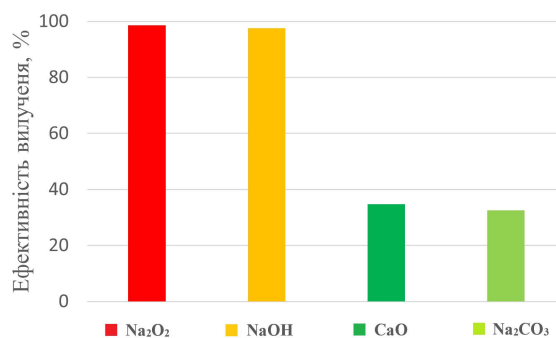


Рис. 1. Ефективність вилучення РЗЕ (за ітрієм) методом спікання з різними спікаючими агентами (флюсами)

Зменшення масового відношення флюсу до золошлаку з 5:1 до 1:1 призвело до зниження загального процентного вмісту РЗЕ, що був вилучений з агломератів  $\text{Na}_2\text{O}_2$  і  $\text{NaOH}$  (рис. 1). Однак зменшення ефективності вилучення РЗЕ не було зіставним зі зниженням співвідношення флюс:ЗШВ, тобто п'ятиразове зменшення використання реагентів не призвело до відповідного п'ятикратного зниження ефективності вилучення РЗЕ (лише до 30%). Ефективність вилучення РЗЕ для спікання зі співвідношенням флюс:золашлак 5:1  $\text{Na}_2\text{O}_2$  і 5:1  $\text{NaOH}$  істотно не відрізнялась, але відрізнялася для дослідів зі співвідношенням 1:1  $\text{Na}_2\text{O}_2$ . Ефективність вилучення РЗЕ при спіканні зі співвідношенням 1:1  $\text{NaOH}$  суттєво не відрізнялася від інших флюсів  $\text{Na}_2\text{O}_2$  і  $\text{NaOH}$ , навіть при співвідношенні 5:1. (рис. 2). Застосування  $\text{NaOH}$  призвело до майже аналогічних результатів вилучення РЗЕ у порівнянні з агломератами  $\text{Na}_2\text{O}_2$ . Оскільки гідроксид натрію дешевший, ніж пероксид, подальші дослідження на вплив температури спікання були зосереджені тільки на спіканні з  $\text{NaOH}$ .

Таблиця 1

Хімічний склад золошлакових відходів Дніпропетровського регіону

Сполука	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{MnO}_2$	$\text{SO}_3$	ППП
Вміст, 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

Таблиця 2  
Вміст мікроелементів у золошлакових відходах

Елемент	Вміст	
	мас.%,	г/т
барій	0,1000	1000
стронцій	0,0420	420
цирконій	0,0330	330
ванадій	0,0140	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

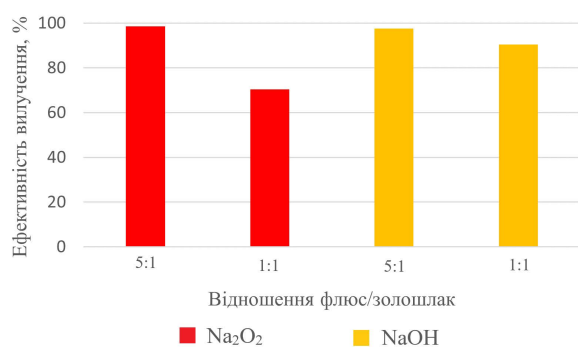


Рис. 2. Вплив відношення флюс:золошлак на ефективність вилучення РЗЕ (за ітрієм)

Зазвичай вилучення цінних компонентів з відходів пов'язано з високотемпературним спіканням при температурах понад 900°C з використанням флюсів CaO та Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Проте такі процеси є енерговитратними і потребують спікання в інертній атмосфері або використання платинових тиглів. Тому подальші дослідження стосувалися визначення ефективності спікаючих реагентів в температурному інтервалі 150–450°C.

Як і очікувалось, ступінь вилучення РЗЕ знижувалась при зниженні температури (рис. 3). При спіканні за температури 350°C і 450°C ефективність вилучення РЗЕ була значно вища, ніж при 250°C і 150°C. Такі результати дозволяють припустити, що при використанні флюсу NaOH існує певна температурна межа, нижче якої ефективність вилучення РЗЕ зменшується. За результатами серії дослідів ця температурна межа визначена на рівні 250–350°C.

Визначений температурний мінімум пов'язаний, вочевидь, з температурою плавлення NaOH. При температурі вище 350°C гідроксид натрію краще змішується і реагує із золошлаками, пе-

ретворюючи алюмосилікати в розчинні у кислоті фази, що в свою чергу приводить до збільшення ефективності вилучення РЗЕ під час вилугування.

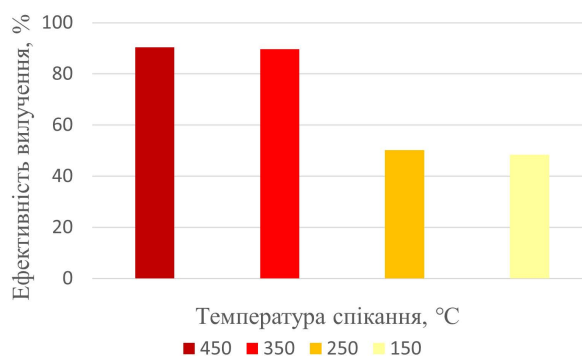


Рис. 3. Вплив температури спікання суміші золашлак:NaOH на ефективність вилучення РЗЕ (за ітрієм)

Попередні дослідники відмічали, що при температурах понад 350°C можливе збільшення ефективності вилучення РЗЕ, але таке збільшення не є суттєвим. Крім того підвищення температури понад 350°C є економічно недоцільним, оскільки призводить до зниження питомої віддачі від енергії, витраченої на підвищення температури. Таким чином, можна стверджувати, що оптимальною температурою спікання золашлаку з NaOH є 350°C.

Дослідження показали, що тільки два спікаючих агента (Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> і NaOH) з чотирьох забезпечили достатньо високі результати вилучення (рис. 1). Спікання з Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> дозволяє забезпечити найвищі результати вилучення, оскільки таке спікання є методом аналізу РЗЕ у золошлакових відходах. Проте спікання з NaOH дало майже аналогічні результати, що дозволяє зробити висновок про доцільність застосування гідроксиду натрію, як дешевої альтернативи для вилучення РЗЕ у промислових масштабах. Більша ефективність застосування флюсів Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> і NaOH обумовлена, вочевидь, їх більш низькими температурами плавлення (495°C і 323°C, відповідно), в той час, як температури плавлення традиційних флюсів (CaO і Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) сягають 2570°C і 854°C, відповідно.

Для уточнення співвідношення флюс:золашлак при спіканні за температури 350°C були проведені додаткові експерименти. Результати показали, що вилучення РЗЕ для агломерату зі співвідношенням NaOH:золашлак 1:1 було більше 91% і суттєво не відрізнялось від вилучення 5:1 (97,5% проти 90,4%). З цього можна зробити висновок,

що зменшення кількості флюсу (NaOH) не обов'язково знижує ефективність вилучення РЗЕ.

#### **Висновки**

У процесі дослідження спікання золошлакових відходів із флюсами (Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NaOH, CaO, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), встановлено, що тип реагенту, співвідношення та температура процесу мають істотний вплив на ефективність вилучення РЗЕ. За результатами досліджень оптимальним флюсом для спікання обраний гідроксид натрію, при співвідношенні NaOH:ЗШВ=5:1, що забезпечує подальший ступінь вилучення РЗЕ (за ітрієм) на рівні 97,5% у порівнянні із співвідношенням NaOH:ЗШВ=1:1 зі ступенем вилучення РЗЕ (за ітрієм) 90,4% за оптимальної температури 350°C.

#### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. *Leaching* and hydrating mechanisms, economic benefits of backfill materials by using coal fly ash–slag-based binder for environmentally sustainable production / Zhao T., Zhang S., Yang H., Ni W., Li J., Zhang G., Teng G. // *Constr. Build. Mater.* – 2023. – Vol.397. – Art. No. 132360.
2. *Ash and slag waste of thermal power plants as a promising raw material of the present* / Khlopytskyi O.O., Kovalenko I.L., Frolova L.A., Skiba M.I., Makarchenko N.P. // *J. Chem. Technol.* – 2023. – Vol.31. – No. 3. – P.635-641.
3. *Synthesis of a multioxide catalyst for the oxidation of ammonia to nitrogen(II) oxide* / Bliznjuk O.N., Masalitina N.Yu., Savenkov A.S., Suvorin A.V., Khlopytskyi A.A. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* – 2019. – No. 3. – P.98-118.
4. *Purification of wastewaters, containing chromium, by a sorbent based on blast furnace slag* / Frolova L.A., Pivovarov A.A., Butyrina T.E., Tsepich E.G. // *J. Water Chem. Technol.* – 2015. – Vol.37. – P.185-190.
5. *Studying the geobarrier ability of furnace slag* / Frolova L., Khlopytskyi O., Kashkald N., Ivanchenko H. // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* – 2023. – Vol.1156. – Art. No. 012032.
6. *Surface chemistry considerations in the flotation of rare-earth and other semisoluble salt minerals* / Zhang X., Du H., Wang X., Miller J. // *Min. Metall. Explor.* – 2013. – Vol.30. P.24-37.
7. *Jordens A., Cheng Y.P., Waters K.E.* A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals // *Miner. Eng.* – 2013. – Vol.41. – P.97-114.
8. *Ketris M.P., Yudovich Ya.E.* Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals // *Int. J. Coal Geol.* – 2009. – Vol.78. – P.135-148.

9. *Kierczak J., Chudy K.* Mineralogical, chemical, and leaching characteristics of coal combustion bottom ash from a power plant located in northern Poland // *Pol. J. Environ. Stud.* – 2014. – Vol.23. – No. 5. – P.1627-1635.

10. *Koltsova Y.I.* influence of sodium salt additives on the properties of coatings containing industrial waste // *J. Chem. Technol.* – 2021. – Vol.29. – No. 1. – P.100-107.

11. *Leaching of FeO and CaO by nitric acid from ash-slag wastes of thermal power plants* / Khlopytskyi A., Savenkov A., Bliznjuk O., Skiba M., Vorobiova V., Masalitina N. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* – 2022. – No. 1. – P.95-99.

Надійшла до редакції 13.09.2023

#### **RESEARCH ON THE EXTRACTION OF RARE EARTH ELEMENTS FROM ASH-SLAG WASTE**

*N. Klymova, O. Khlopytskyi\*, I. Kovalenko, N. Makarchenko*  
Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

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

The research investigates the patterns of rare earth elements (REE) extraction from ash-slag waste of thermal power plants using sintering processes. The aim of the study was to determine the optimal parameters for the process: the composition of the flux, the ratio of the sintering flux to the waste, and the sintering temperature. It has been shown that the change in the type of sintering reagent, its ratio to the waste, and the process temperature significantly affect the degree of REE extraction from the insoluble form in ash-slag to the soluble form in sinter. The optimal sintering temperatures (300–450°C) for the extraction of REE from ash-slag waste have been determined. The influence of various sintering reagents on the process of REE extraction from ash-slag waste has been investigated. It has been shown that the use of sodium hydroxide as a sintering reagent allows increasing the degree of REE extraction from waste up to 100%. Based on the analysis of the obtained experimental data, the main technological parameters of REE extraction in sinter have been determined.

**Keywords:** waste; ash; slag; rare earth elements; separation; extraction; secondary raw materials; sintering.

#### **REFERENCES**

1. Zhao T, Zhang S, Yang H, Ni W, Li J, Zhang G, et al. *Leaching and hydrating mechanisms, economic benefits of backfill materials by using coal fly ash–slag-based binder for environmentally sustainable production.* *Constr Build Mater.* 2023; 397: 132360. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132360.
2. Khlopytskyi OO, Kovalenko IL, Frolova LA, Skiba MI, Makarchenko NP. *Ash and slag waste of thermal power plants as a promising raw material of the present.* *J Chem Technol.* 2023; 31(3): 635-641. doi: 10.15421/jchemtech.v31i3.286130.
3. Bliznjuk ON, Masalitina NYu, Savenkov AS, Ogurtsov AN, Suvorin AV, Khlopytskyi AA. *Synthesis of a multioxide catalyst for the oxidation of ammonia to nitrogen(II) oxide.* *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii.* 2019; (3): 98-108. doi: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-98-108.

---

4. Frolova LA, Pivovarov AA, Butyrina TE, Tsepich EG. Purification of wastewaters, containing chromium, by a sorbent based on blast furnace slag. *J Water Chem Technol*. 2015; 37: 185-190.

5. Frolova L, Khlopytskyi O, Kashkalda N, Ivanchenko H. Studying the geobarrier ability of furnace slag. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2023; 1156: 012032. doi: 10.1088/1755-1315/1156/1/012032.

6. Zhang X, Du H, Wang X, Miller J. Surface chemistry considerations in the flotation of rare-earth and other semisoluble salt minerals. *Min Metall Explor*. 2013; 30: 24-37. doi: 10.1007/BF03402338.

7. Jordens A, Cheng YP, Waters KE. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Miner Eng*. 2013; 41: 97-114. doi: 10.1016/j.mineng.2012.10.017.

8. Ketris MP, Yudovich YaE. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *Int J Coal Geol*. 2009; 78: 135-148. doi: 10.1016/j.coal.2009.01.002.

9. Kierczak J, Chudy K. Mineralogical, chemical, and leaching characteristics of coal combustion bottom ash from a power plant located in northern Poland. *Pol J Environ Stud*. 2014; 23(5): 1627-1635.

10. Koltsova YI. Influence of sodium salt additives on the properties of coatings containing industrial waste. *J Chem Technol*. 2021; 29(1): 100-107. doi: 10.15421/082105.

11. Khlopytskyi A, Savenkov A, Bliznjuk O, Skiba M, Vorobiova V, Masalitina N. Leaching of FeO and CaO by nitric acid from ash-slag wastes of thermal power plants. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2022; (1): 95-99. doi: 10.32434/0321-4095-2022-140-1-95-99.