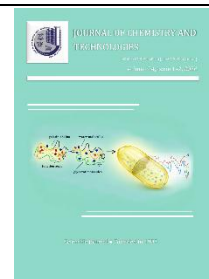




Journal of Chemistry and Technologies

pISSN2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>
 editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC 628.477

RESEARCH ON THE EXTRACTION OF ALUMINA FROM ASH AND SLAG WASTE FROM THERMAL POWER PLANTS

Yuriy A. Gorbachov, Oleksii O. Khlopytskyi*, Natalia P. Makarchenko

Ukrainian State University of Science and Technologies, Research Institute of USUCT, 2, Lazaryana str., Dnipro, 49010, Ukraine

Received 1 March 2026; accepted 13 April 2026; available online 20 June 2026

Abstract

This paper reviews studies on the processing of ash and slag waste from thermal power plants and the fractions obtained from them. It has been established that ash and slag waste is a potential secondary raw material for the production of alumina. The morphological and chemical composition of the ash and slag waste and the fractions obtained from them has been determined. The proposed processing method allows for the extraction of alumina from the non-magnetic fraction, which is the most optimal. It was found that the non-magnetic fraction contains 27.4 % alumina, as opposed to the original waste 17.4 %. It was established that the morphology and ratio of the initial reagents have a significant influence on the sintering process at different temperature ranges and for different durations of the process itself. It was established that an increase in temperature has an insignificant effect on the process of the transition of alumina from aluminosilicates of different chemical compositions to sodium aluminosilicate.

Keywords: ash waste; alumina; enrichment; fractions; magnetic; non-magnetic; processing.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЛУЧЕННЯ ГЛІНОЗЕМУ ІЗ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Юрій А. Горбачов, Олексій О. Хлопицький, Наталія П. Макаренко

Український державний університет науки і технологій, ННІ УДХТУ, вул., Лазаряна 2, Дніпро, 49010, Україна

Анотація

У даній роботі розглянуті дослідження з переробки золошлакових відходів теплових електростанцій та фракцій отриманих з них. Встановлено, що золошлакові відходи це потенційна вторинна сировина для отримання глинозему. Встановлено морфологічний та хімічний склад золошлакових відходів та фракцій отриманих з них. Запропонований метод переробки дає змогу для вилучення глинозему із немагнітної фракції, як найбільш оптимальної. Встановлено, що немагнітна фракція містить 27.4 % глинозему на відміну від вихідних відходів 17.4 %. Встановлено, що морфологія та співвідношення вихідних реагентів мають суттєвий вплив на процес спікання в різних інтервалах температур та за різної тривалості самого процесу. Встановлено, що підвищення температури несуттєво впливає на процес переходу глинозему із алюмосилікатів різного хімічного складу в алюмосилікат натрію.

Ключові слова: золошлакові відходи; глинозем, збагачення; фракції; магнітна; немагнітна; переробка.

*Corresponding author: tel.: 0669338866; e-mail: ahlopitskiy@gmail.com

© 2026 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v34i2.353351

Вступ

Використання вугільного палива на теплоелектростанціях (ТЕС) є одним з основних джерел енергії, проте цей процес призводить до утворення значних обсягів золошлакових відходів (ЗШВ) [1–3]. В Україні щорічно генерується до 7 мільйонів тонн таких відходів, а загальний обсяг накопичених ЗШВ станом на 2020 рік перевищував 360 мільйонів тонн. За найскромнішими підрахунками, до 2035 року цей показник може зрости до понад 415 мільйонів тонн [4; 5]. Ця проблема є особливо гострою, оскільки рівень утилізації ЗШВ в Україні становить лише 8.3 %, що різко контрастує з показниками країн Європейського Союзу, де цей показник сягає 43 %, а в деяких випадках досягає і 100 % [6; 7]. Такий низький рівень утилізації підкреслює значний невикористаний потенціал та нагальну потребу в ефективних рішеннях.

Вилучення глинозему (Al_2O_3) із золошлакових відходів є надзвичайно актуальним напрямком, що має подвійну цінність. По-перше, ЗШВ є цінним вторинним джерелом глинозему та діоксиду кремнію (SiO_2) [8; 9]. Вміст глинозему в деяких типах золи може бути зіставним із бокситами, які є традиційною сировиною для виробництва алюмінію [10–12]. З огляду на вичерпність природних запасів бокситів та постійно зростаючий світовий попит на глинозем, використання вторинних джерел стає стратегічно важливим [13–15]. По-друге, переробка ЗШВ для вилучення цінних компонентів сприяє вирішенню масштабних екологічних проблем. Накопичення золошлаків призводить до забруднення ґрунту, водних ресурсів та повітря важкими металами й іншими токсичними речовинами. Це спричиняє зниження родючості ґрунту, негативний вплив на біорізноманіття та займає значні площі сільськогосподарських угідь. Таким чином, вилучення глинозему та й інших сполук не лише забезпечує доступ до цінного ресурсу, але й перетворює екологічну відповідальність на економічну можливість, сприяючи принципам циркулярної економіки [16–17].

Під час вибору технологій вилучення глинозему із ЗШВ вирішальне значення має попередня характеристика сировини. ЗШВ класифікуються на клас F (переважно з бітумінозного та антрацитового вугілля, з

низьким вмістом CaO та високим вмістом Al_2O_3) та клас C (з суббітумінозного вугілля, з високим вмістом CaO) [18]. Клас F, що містить алюмосилікатне скло та муліт, є значно прямішим і перспективнішим джерелом глинозему. Це вказує на те, що ефективність і економічна доцільність процесу значною мірою залежать від складу вихідного ЗШВ, що вимагає адаптації технологічних підходів. Дрібнодисперсний характер золи в золошлаку частинки розміром від 10 до 100 мкм – є перевагою, оскільки зменшує або усуває необхідність в енергоємному подрібненні, що є типовим етапом переробки мінеральної сировини [19]. Це безпосередньо знижує капітальні та експлуатаційні витрати. Однак високий вміст незгорілого вуглецю, який враховується як втрата під час прожарювання, може бути проблемою). Значний вміст вуглецю може перешкоджати хімічним реакціям та знижувати чистоту кінцевого продукту, що може вимагати попередньої обробки за його видалення. Таким чином, детальна характеристика хімічного та мінералогічного складу золи є першочерговим завданням для вибору та оптимізації процесу вилучення глинозему.

Метою роботи є дослідження вилучення глинозему із золошлакових відходів з використанням різних фізико-хімічних методів для його подальшого використання в різних галузях промисловості.

Матеріали та методи досліджень

У роботі використовували золошлакові відходи Криворізької ТЕС та їх фракції, які представляють собою розсіпчастий матеріал сірувато-чорного кольору й різного фракційного складу [20]. Дослідження фазового та хімічного складу золошлакових відходів та їхніх фракцій проводили з використанням сучасних методів аналізу: рентгенофазового аналізу (дифрактометр ДРОН-3); чистоту матеріалу визначали рентгенофлюорисцентним аналізатором («EXPERT 02L, спектрометра «Elvax») та хімічний склад досліджуваних зразків визначали методом рентгенофлюорисцентного аналізу за допомогою прецезійного аналізатора EXPERT3L. Границя виявлення елементів за 100 с (від 12Mg до 92U) становить ≤ 0.05 %.

Результати та їх обговорення

Останнім часом запаси глинозему як критичного матеріалу для різних галузей промисловості поступово скорочується, що дає поштовх для пошуку його альтернативних джерел існування не тільки серед природної сировини але і серед відходів промислових виробництв. Одним із таких джерел є саме

золошлакові відходи теплових електростанцій, де вміст глинозему складає від 18 до 35 % в залежності від виду та марки вугілля і способу його спалювання. Порівняльна характеристика альтернативних джерел, які містять глинозем, представлена в таблиці 1.

Table 1

Alternative sources of alumina

Таблиця 1

Альтернативні джерела глинозему

Компонент	Боксит (руда), %	Нефелін (руда),%	Алуніт (мінерал), %	Золошлакові відходи (ЗШВ), %	Червоний шлам (відхід Байера), %
Al ₂ O ₃	45-65	25-30	35-40	18-35	10-20
SiO ₂	1-10	45-50	25-35	40-60	3-15
Fe ₂ O ₃	5-30	5-10	1-5	5-15	30-60
K ₂ O	0.1-0.5	8-12	5-10	~1	0.1-0.5
Na ₂ O	0.1-0.5	12-16	~0.1	~1	1-7
Інші компоненти	TiO ₂	CaO, MgO	SO ₃	CaO, MgO	TiO ₂

З аналізу представлених табличних даних можна довести, що вміст глинозему в усіх запропонованих сировинних джерел складає від 10 % у червоному шламі до 65 % у бокситних рудах, які є основним джерелом отримання глинозему із природної сировини. Водночас відзначимо різний вміст діоксиду кремнію, як основної супутньої сполуки, яка заважає вилученню самого глинозему. В технології одержання глинозему суттєвий вплив має так званий силікатний модуль (СМ), який показує, в скільки разів вміст оксиду алюмінію більший за вміст діоксиду кремнію в сировині. В залежності від значення силікатного модуля і обирається технологія одержання глинозему із природної або вторинної сировини. За значень СМ

більше 5 використовують метод Баєра (лужне вилуговування), а за значень менше 5 – методи спікання в поєднанні з іншими методами [21; 22]. У зв'язку з цим нами розглядається можливість вилучення глинозему із золошлакових відходів як альтернативної втор сировини в зв'язку із збідненням основного джерела – бокситових руд.

Золошлакові відходи представляють собою частинки матеріалу різної форми та різних розмірів, що неодмінно буде впливати в подальшому на процес вилучення глинозему. У зв'язку з цим нами були проведені дослідження по встановленню морфологічних характеристик вихідного золошлаку (рисунк 1).

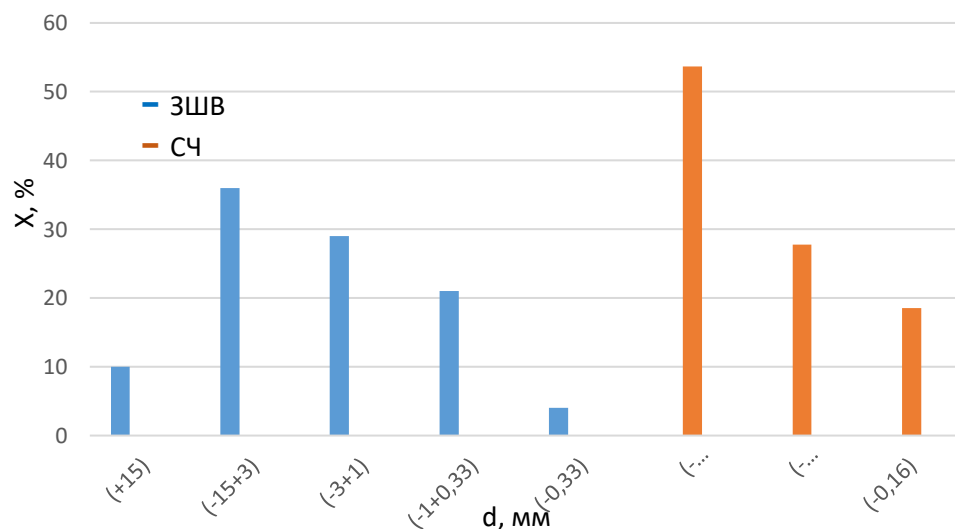


Fig. 1. Morphology of ash and slag waste (ASW – ash and slag waste, SP – spherical particles)

Рис 1. Морфологія золошлакових відходів (ЗШВ – золошлакові відходи, СЧ – сферичні частинки)

Аналіз результатів дослідження дозволяє стверджувати, що основна частина відходів (86 %) представлена частинками із розмірами від 0.33 мм до 15мм, також наявні частинки сферичної форми (26.5 % від їх загальної кількості). Серед сферичних частинок переважає розмір від 0.33 мм до 0.5 мм (53.7 %).

Встановлено, що розподіл відходів за розміром відіграє значну роль у ефективності подальшої переробки золошлакових відходів.

Хімічний склад золошлакових відходів за основними компонентами представлений у таблиці 2.

Table 2

Chemical composition of ash and slag waste

Таблиця 2

Хімічний склад золошлакових відходів				
Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Інші
%, мас	42.6	17.4	29.4	10.6

За результатами аналізу хімічного складу відходів можна сказати, що вміст глинозему (Al₂O₃) складає 17.4 %, що є не дуже економічно привабливим для його подальшого вилучення. В зв'язку з цим нами

було запропоновано підвищення його вмісту з використанням фізико-хімічних методів збагачення [23–25].

Хімічний склад основних одержаних фракцій представлений у таблиці 3.

Table 3

Chemical composition of the main fractions obtained

Таблиця 3

Хімічний склад основних одержаних фракцій				
Магнітна фракція				
Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Інші
%, мас	36.3	16.9	43.3	3.5
Немагнітна фракція				
Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Інші
%, мас	57.8	27.4	13.6	1.2

Як видно із результатів аналізу, вміст глинозему суттєво зріс у немагнітній фракції: до 27.4 % порівняно із його вмістом у вихідних золошлакових відходах (17.4 %) до збагачення, що дає змогу для його подальшого вилучення.

Глинозем у золошлакових відходах представлений здебільшого в вигляді алюмосилікатів різного хімічного складу, які утворилися після спалювання вугілля на теплоелектростанціях. Існує безліч методів вилучення глинозему із відходів, але не всі вони дають змогу його повного вилучення. Нами запропонований метод спікання немагнітної фракції як один із перспективних методів вилучення глинозему [23–25]. У якості спікаючих реагентів можна використовувати карбонат кальцію, карбонат натрію та натрій гідроксид але їх використання в першу чергу зумовлено властивостями до спікання та температурою самого процесу. Адже їхні температури плавлення відповідно: карбонат кальцію – 900–1200 °С, карбонат натрію – 850 °С та натрій гідроксид – 323 °С. В якості реагенту

для спікання нами обраний – натрій гідроксид.

Отже, з метою встановлення найповнішого переходу глинозему (в перерахунку на оксид алюмінію) із немагнітної фракції (НФ) у спік, нами була проведена серія дослідів у інтервалі температур 350–450 °С, інтервалі часу 30–90 хв та співвідношенні НФ : NaOH 1 : (1–3). Результати досліджень представлені на рисунках 2–4.

Аналіз рисунок 2 дозволяє стверджувати, що відношення НФ до NaOH не суттєво впливає на процес вилучення глинозему, а саме 85 % (1 : 1) і 87 % (1 : 3) за тривалості процесу 60 хв, тобто співвідношення НФ : NaOH = 1 : 1 дає змогу економити реагент натрій гідроксид. Підвищення температури до 400 °С (рисунок 3) не суттєво впливає на процес, а саме ступінь вилучення глинозему збільшується лише з 85 до 86 % за співвідношення реагентів 1 : 1 і з 87 % до 88 % за 1 : 3 відповідно. Результати дослідження (рисунок 4) за підвищення температури процесу до 450 °С, показують, що вплив температури підвищує ступінь вилучення глинозему лише за тривалості

процесу 30 хв, а саме від 82 % до 85 % за співвідношення від 1 : 1 до 1 : 3 відповідно, а інші параметри залишаються в тих самих межах.

Підводячи підсумки стосовно впливу температури, тривалості процесу та співвідношення реагентів, можна

стверджувати, що оптимальними з точки зору енерговитрат та реагентовитрат є відповідно температура процесу спікання 350 °С за співвідношення НФ : NaOH = 1 : 1 і тривалості процесу 60 хв. Подальше збільшення цих параметрів не дає суттєвого результату.

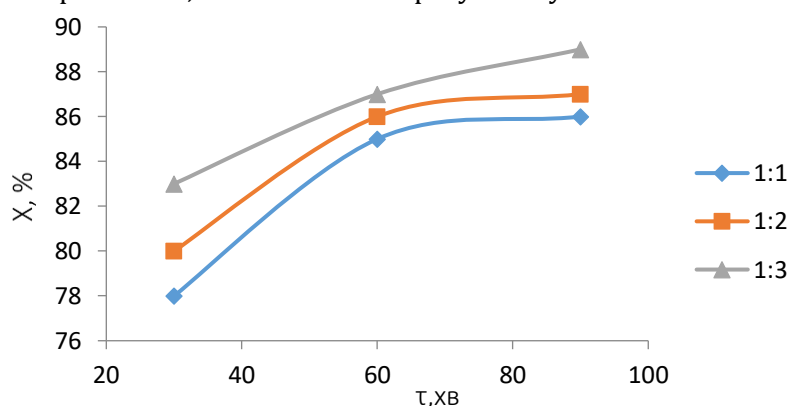


Fig. 2. Dependence of the degree of alumina extraction from NF in sodium aluminate (in terms of aluminum oxide) at 350 °C.

Рис. 2. Залежність ступеня вилучення глинозему із НФ у алюмінат натрію (в перерахунку на оксид алюмінію) за 350 °C

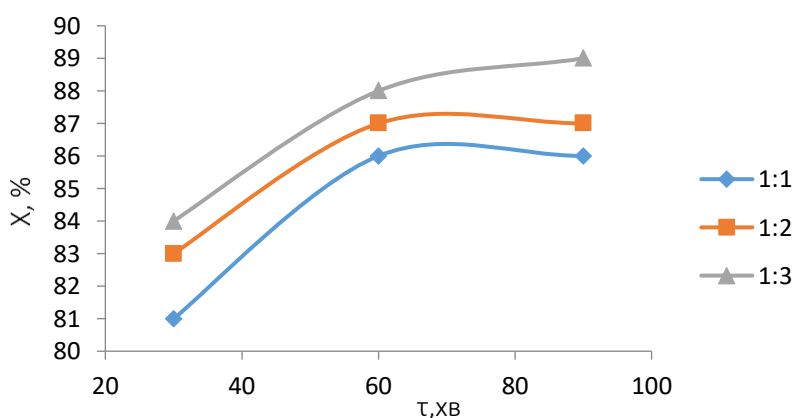


Fig. 3. Dependence of the degree of alumina extraction from NF in sodium aluminate (in terms of aluminum oxide) at 400 °C.

Рис. 3. Залежність ступеня вилучення глинозему із НФ у алюмінат натрію (в перерахунку на оксид алюмінію) за 400 °C

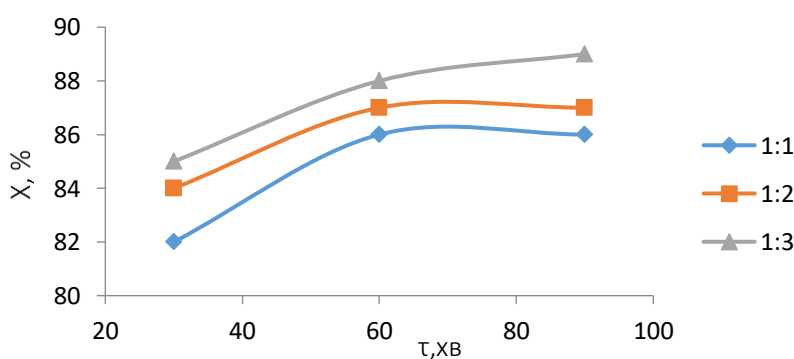


Fig. 4. Dependence of the degree of alumina extraction from NF in sodium aluminate (in terms of aluminum oxide) at 450 °C.

Рис. 4. Залежність ступеня вилучення глинозему із НФ у алюмінат натрію (в перерахунку на оксид алюмінію) за 450 °C

З метою дослідження впливу розміру частинок немагнітної фракції на процес спікання нами були проведені серії дослідів з частинками з розмірами 0.25 мм, 0.5 мм та 0.75 мм із

застосуванням оптимальних параметрів, встановлених раніше, а саме температури процесу спікання 350 °С, співвідношенні НФ : NaOH, = 1 : 1 і тривалості процесу 60 хв (рисунок 5).

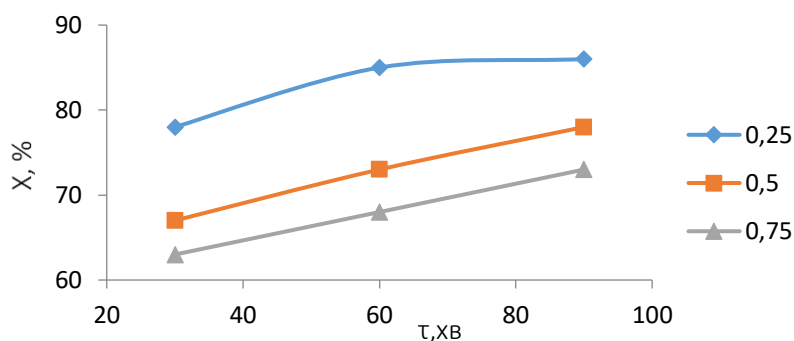


Fig. 5. Dependence of the degree of alumina removal from NF in sodium aluminate (in terms of aluminum oxide) on the particle size of NF.

Рис. 5. Залежність ступеня вилучення глинозему із НФ у алюмінат натрію (в перерахунку на оксид алюмінію) в залежності від розміру частинок НФ.

Аналіз експериментальних даних рисунку 5 можна стверджувати, що чим менше розмір частинок, тим краще відбувається процес вилучення глинозему. Припускаємо, що це пов'язано із дифузійним процесом, який проходить між плавом натрію гідроксиду та твердими частинками немагнітної фракції золошлакових відходів. Отже оптимальним

розміром частинок НФ для процесу спікання є 0.25 мм.

З метою підтвердження наявності в продуктах спікання алюмінату натрію як основної сполуки, що відповідає за перенос оксиду алюмінію із алюмосилкатів різного складу, нами були проведені рентгенофазові дослідження спіку, результати якого представлені на рисунку 6.

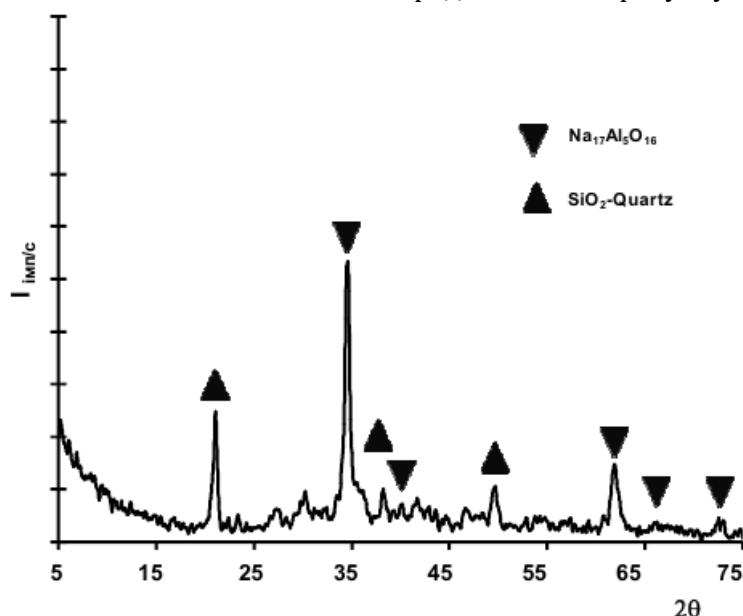


Fig. 6. X-ray diffractogram of the obtained spicule
Рис. 6. Рентгенівська дифрактограма одержаного спіку

Як видно із даних рентгенограми, основними сполуками спіку є алюмінат натрію та діоксид кремнію.

Висновки та перспективи досліджень

З нашої точки зору оптимальним варіантом для одержання глинозему є

немагнітна фракція золошлакових відходів, яка містить глинозему – 27.4 % в порівнянні із 17.4 % в вихідних відходах, що вказує на необхідність попереднього фракційного розділення. Технологічні параметри проведення процесу спікання немагнітної фракції із гідроксидом натрію мають значний вплив на перехід глинозему із нерозчинної

фази алюмосилікатів різного складу в алюмінат натрію.

Потенціал використання немагнітної фракції золошлакових відходів як джерела глинозему дуже значний у зв'язку із зменшенням запасів бокситових руд. Наступним етапом для вилучення глинозему із одержаного спіку будуть процеси вилуговування і осадження.

References

- [1] Navid, R., Carsten, K. (2017). Cenospheres: A review. *Fuel*, 207, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.059>
- [2] Bennet, T., Piet, D., Chandan, K., SaiSreeVarsha, V., Singh, R., Sankar, B. (2024). Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112769. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112769>
- [3] Gonchar, V., Sezonenko, O., Gonchar, O., Nazarenko, O., Yalyshev, A., Aleksyeyenko, V. (2025). Research of the properties of the content of ash and slag heaps of the ladyzhynskaya thermal power plants to develop the process of their rational use. *Energy Technologies & Resource Saving*, 82(1), 107–117. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.07>
- [4] Chang, L., Tao, C., Qin-Yi, Z., Lai-Shou, L., Zhou, C., Zhi-Ping, F. (2020). Remediation of lead polluted soil by active silicate material prepared from coal fly ash. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111409. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111409>
- [5] Zbykovskyy, Y., Kostetsky, Y., Pedchenko, Y., Shvets, I., Zaitsev, V. (2025). Prospects for metallurgical processing of ash and slag waste from coal-fired power plants under electroslag smelting conditions with metals extraction. *Metal - International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 55–60. DOI: 10.37904/metal.2025.5068
- [6] Mahantayya, M., Kiran, A., Durga, P., Jayavardhana, T., Hemanth, R. (2022). A review on fly ash utilization. *Materials Today: Proceedings*, 50(5), 1535–1540. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.106>
- [7] Lang, X., Guanghui, L., Jun, L., Hao, J. (2025). From waste to wealth: Separation of alumina from coal fly ash and synergistic preparation of soil amendments. *Journal of Environmental Management*, 385, 125675. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125675>
- [8] Abdelrahman, K., Ines, B., Lubna, J., Alaa, A., Ismail, A., Mohammad, A., Muataz, A. (2025). Fly ash as zero cost material for water treatment applications: A state of the art review. *Separation and Purification Technology*, 354(Part 5), 129104. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129104>
- [9] Yanxia, G., Zesen, Z., Qian, Z., Fangqin, C. (2017). Novel process of alumina extraction from coal fly ash by pre-desilicating - Na₂CO₃ activation - Acid leaching technique. *Hydrometallurgy*, 169, 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.021>
- [10] Xiongfei, H., Xunrong, H., Hanghang, Z., Fuhao, L., Lu, W., Xin, Z., Pengcheng, G., Xiuying, L., Puhui, J. (2021). Possibility of using modified fly ash and organic fertilizers for remediation of heavy-metal-contaminated soils. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124713. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124713>
- [11] Behera, S., Mishra, D., Prashant, S., Mishra, S., Mandal, C., Ghosh, R., Phanil, K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, 309, 125120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125120>
- [12] Khlopytskyi, O. O., Kovalenko, I. L., Frolova, L. A., Skiba, M. I., Makarchenko, N. P. (2023). Ash and slag waste of thermal power plants as a promising raw material of the present. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(3), 635–641. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.286130>
- [13] Doshukhamedov, N., Zholdasbay, 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>
- [14] Pengxu, C., Guanghui, L., Hao, J., Xin, Z., Jun, L., Mingjun, R., Tao, J. (2021). Extraction and value-added utilization of alumina from coal fly ash via one-step hydrothermal process followed by carbonation. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129174. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129174>
- [15] Chao, W., Guogang, X., Xinyue, G., Yuanhui, G., Peng, Z. (2021). High value-added applications of coal fly ash in the form of porous materials: A review. *Ceramics International*, 47(6), 22302–22315. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.070>
- [16] Frolova, L., Khlopytskyi, O., Kashkald, N., Ivanchenko, H. (2023). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1), 012032. DOI 10.1088/1755-1315/1156/1/012032
- [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), 98–108. DOI: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-98-108
- [18] Tong, Z., Siqi, Z., Huifen, Y., Wen, N., Jia, L., Ge, Z., Guoxiang, T., Xuan, L., Song, G., Yichen, Z., Zeping, W. (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, 132360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132360>
- [19] Pengxu, C., Jun, L., Hao, J., Xin, Z., Mingjun, R., Guanghui, L. (2022). Extraction of alumina from low-grade kaolin in the presence of lime and NaOH via multi-stage hydrothermal process. *Applied Clay Science*, 229, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106675>

- [20] 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)
- [21] Mingfei, X., Xiaofang, W., Zixin, L., Fan, Z., Yaping, W., Li, Z. (2023). Rare earth element recovery and aluminum-rich residue production from high alumina fly ash by alkali pre-desilication enhance the mechanochemical extraction process. *Process Safety and Environmental Protection*, 175, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.022>
- [22] Zhou-qing, J., Jing, Y., Hong-wen, M., Le, W., Xi, M. (2015). Reaction behaviour of Al₂O₃ and SiO₂ in high alumina coal fly ash during alkali hydrothermal process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(6), 2065–2072. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63816-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63816-X)
- [23] Shchukina, L., Galushka, Ya., Khlopytskyi, A., Savenkov, A. (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)
- [24] Klymova, N., Khlopytskyi, O., Kovalenko, I., Frolova, L., Makarchenko, N. (2025). Study of beneficiation waste processing iron ore. *Journal of Chemistry and Technologies*, 33(2), 474–482. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i2.328767>
- [25] Klymova, N., Khlopytskyi, O., Kovalenko, I., Makarchenko, N. (2024). Research on the extraction of rare earth elements from ash-slag waste. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (2), 26–31. DOI: [10.32434/0321-4095-2024-153-2-26-31](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-26-31)