

СУПУТНІ ПОРОДИ ВУГЛЕВИДОБУТКУ ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ МІНЕРАЛЬНИЙ РЕСУРС

Хоботова Е. Б., Даценко В. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Обґрунтовано ресурсну цінність незгорілих вугільних порід шахт Східного Донбасу. Ці породи містять аморфні фази й кристалічну частину, в якій є мінерали мусковіт, кварц і клінохлор. Породи визначаються як ультракислі. Спечені вугільні породи містять скляну фазу, в якій розподілені кристали мінералів: залізистих шпінелей, муліту, піроксенів (діопсиду й геденбергіту), що утворилися внаслідок протікання високотемпературних реакцій. Можливість використання вугільних порід у виробництві цементу підтверджено подібністю їх оксидного складу. Високий вміст Fe_2O_3 сприяє утворенню розплаву, в якому вапно краще реагує з іншими мінералами. Сумісна присутність Al_2O_3 й Fe_2O_3 призводить до утворення алюмоферитів Са зі збільшеним вмістом алюмінату. Гідравлічну активність порід оцінювали за поглинанням вапна. Високий вміст склофази, наявність Al_2O_3 й Fe_2O_3 , висока гідравлічна активність порід роблять їх придатними для використання у виробництві вапняно-шлакових в'язучих речовин, глиноземистого цементу та як коригувальних або активних добавок до портландцементного клінкеру. Способом додавання породи до сировинної суміші можна регулювати глиноземистий та глинітно-залізистий модулі.

Ключові слова: гірська порода вугільної промисловості, петрографічний аналіз, гідравлічна активність, модульна класифікація, будівельні матеріали.

Вступ

Супутні породи підприємств деяких галузей промисловості накопичуються у відвалах і териконах, займаючи великі території та становлячи небезпеку для навколишнього природного середовища. Поступове розкладання породних мінералів, особливо під впливом кислотних дощів, призводить до утворення більш дисперсних фракцій та інтенсивного пилоутворення. Унаслідок вимивання сполук забруднюються ґрунт і поверхневі води.

Відповідно до концепції стійкого розвитку вчені прагнуть з'ясувати можливості утилізації порід відвалів для отримання технічно корисних матеріалів. Це забезпечує економне використання мінеральних ресурсів.

Аналіз публікацій

У літературі наведено чимало прикладів застосування пустих порід і відходів у різноманітних технологіях. Промислові відходи, що зазнали термічного оброблення, окиснення й модифікації структури поверхні, часто виявляють сорбційну активність [1]. Різноманітні відходи можуть бути альтернативними джерелами палива й енергії [2]. Важливо виявляти у відходах компоненти з технічно корисними властивостями та споживчою привабливістю. Завдяки цьому можна скоротити кількість відвалів і хвостосховищ, а також розширити об'єми перероблення й пере-

творення супутніх порід [3]. У будівельній галузі давно використовують різні промислові відходи як замітник первинної сировини. Усунення накопичення переробних відходів і застосування їх як джерела сировини забезпечує перероблення відповідно до концепції циклічної економіки [4]. Видобуток вугілля й гірських порід дає великі об'єми вміщувальних і відвальних порід, які поповнюють відвали й терикони [5, 6].

Відвальні породи вугільної промисловості використовуються для будівництва тимчасових кар'єрів і під'їзних доріг. Висока міцність на зсув і статичний модуль пружності є основними показниками визначення ефективного гранулометричного складу наповнювача [7]. Екологічно чистим застосуванням вугілля й відходів гірничодобувної промисловості є виробництво цегли [8]. Поліпшені властивості цегли досягаються за певних параметрів процесу й співвідношення компонентів. Відходи гірничодобувної промисловості можуть бути сировиною у виробництві цементу [9]. Обґрунтовано ресурсну цінність гірських порід, що містять високоактивні модифікації оксидів Si, Al та Fe [10]. Цим породам властива висока гідравлічна активність, що дає змогу використовувати їх як пуцоланово-глинітну добавку до цементного клінкеру або як мікронаповнювач в асфальтових в'язучих.

Основними компонентами відходів вуглевидобутку є неорганічні речовини (80–90 %), решта – органічні сполуки. Неорганічні речовини можуть бути як у кристалічному, так і в аморфному стані. Ключовим фактором, що визначає стан речовини, є температура випалювання у відвалах. Самозаймання відвалів відбувається внаслідок окиснення органічних сполук і самонагрівання гірських порід. Ступінь термічної трансформації речовин визначається тривалістю та швидкістю випалювання, температурою нагріву й доступом кисню [11, 12]. Гірські породи з відвалів Східного Донбасу у вигляді аргілітових глин, аргілітів, сланців і алевролітів використовуються у виробництві стінової кераміки [13]. Високоякісну цеглу з високими фізико-механічними властивостями виготовляють з аргілітів. Як сировину для виробництва гідралічного вапна застосовують суміш відходів збагачення вугілля, відходів вуглевидобутку, глинистих мінералів і доломітових відходів у співвідношенні 1:1–1:2 [14]. Як сировину для виробництва пуцоланових цементів можна використовувати певні види інертних відходів вуглевидобутку та їх переробки [15]. Крім того, відходи вугільної промисловості є концентраторами природних радіонуклідів і можуть становити певну небезпеку. Тому актуальним є радіоекологічний моніторинг промислових відходів, що застосовуються як сировина [16].

Розподіл частинок відходів за розмірами багато в чому визначає їх мінералогічний та елементний склад. Хімічний склад коксу варіюється залежно від розміру частинок, а визначальним фактором є петрографічний склад вугільної шихти [17]. Тому остаточний висновок про утилізацію відходів можна зробити лише після вивчення їх середніх зразків і окремих гранулометричних фракцій.

Метод визначення ресурсної цінності промислових відходів для їх перероблення в технічні матеріали [18] оптимізує систематичний характер досліджень, підвищуючи їх усебічність і ефективність. Поєднання методів дослідження дає змогу визначити мінеральний, елементний і радіонуклідний склад промислових відходів, поверхневу структуру їх частинок, сорбційну й гідралічну активність, поведінку мінералів в умовах нагрівання. Комплексне вивчення властивостей різних відходів вуглевидобутку сприятиме розробленню рекомендації щодо їх практичного застосування в технологіях виробництва будівельних матеріалів.

Мета роботи

Метою дослідження є вивчення петрографічних і гідралічних властивостей відвальних порід шахт Східного Донбасу й аналіз потенціалу їх використання у виробництві будівельних матеріалів.

Матеріали й методи дослідження

Досліджено відвальні породи шахт «Хмельницької» та ім. Свердлова Луганської області.

Елементний склад відвалів гірських порід визначали методом електронно-зондового мікроаналізу INCA на сканувальному електронному мікроскопі JSM-820. За результатами елементного аналізу розраховували оксидний склад.

Петрографічне дослідження зразків проводили в прозорих зрізах з використанням мікроскопів MIN-8 і Nu-2E у світлі, що проходить.

Гідралічну активність відвальних порід визначали за кількістю абсорбованого вапна CaO. Цей метод підходить для кислих порід і шлаків. Зразок подрібненої породи (10 г) замочували в насиченому розчині вапна із густиною 0,995 г/см³. Вміст активної CaO у розчині визначали титруванням протягом 30 діб через певні інтервали часу. Максимум поглинання спостерігався на третю добу.

Для вивчення поведінки мінералів і аморфної фази відвальних порід за високих температур, наприклад у виробництві цементного клінкеру, спікання проводили в інтервалі температур 1400–1580 °C з максимальним терміном витримки 10 год в окислювальному середовищі O₂ і CO₂.

Виклад основного матеріалу

Мінералогічний і оксидний склад пустої породи. Згідно з рентгенофазовим аналізом у кристалічній частині пустої породи присутні кілька мінералів [10]:

- кварц SiO₂;
- клінохлор (Mg,Fe)₆(Si,Al)₄O₁₀(OH)₈;
- мусковіт

$K_{0,94}Na_{0,06}Al_{1,83}Fe_{0,17}Mg_{0,03}(Al_{0,91}Si_{3,09}O_{10})(OH)_{1,65}O_{0,12}F_{0,23}$.

За спаданням масового вкладу мінерали розташовуються в ряд мусковіт > кварц > клінохлор. Клінохлор і мусковіт – це глинисті мінерали, які можна використовувати у виробництві портландцементного клінкеру [19].

Хвиляста властивість отриманих дифракційних картин свідчить про наявність сполук

в аморфному стані. Загальну картину елементного складу в кристалічному й склоподібному станах отримано за допомогою рентгенівського мікроаналізу зразків, результати якого для частини породи, що не містить карбон, подано в табл. 1.

Решта породи містить карбон, що вказує на низький ступінь випалювання породи у відвалах.

На основі показників елементного аналізу було розраховано оксидний склад вугільних порід (табл. 1). Досягнуті результати зіставлені з інформацією про оксидний склад глин, що використовуються як сировина у виробництві портландцементного клінкеру [20, 21]. У досліджених породах шахти ім. Свердлова вміст Al_2O_3 й Fe_2O_3 завищений порівняно з показниками [20]: 1,16–20,28 % Al_2O_3 та 4,04–9,15 % Fe_2O_3 . Вміст CaO , MgO та SiO_2 коливається в межах рекомендованих діапазонів. Низький вміст основних оксидів CaO , MgO і високий вміст кислих оксидів SiO_2 та Al_2O_3 вказують на кислу властивість відходів. Ця ситуація не змінюється після спікання. За модулем кислотності спечені породи визначають як ультракислі. Вміст SiO_2 має

бути ≥ 60 % для порід цієї класифікаційної групи [21]. У цьому разі кислотність порід однаково визначається як SiO_2 , так і Al_2O_3 .

Дослідження зразків спеченої пустої породи петрографічним методом. Молярна концентрація SiO_2 визначає структуру силіцій-оксигенових комплексів, кислотно-основні властивості, в'язкість і характеристики кристалізації розплавів.

Досліджувані ультракислі породи утворюють кислі розплави із вмістом SiO_2 , що перевищує вміст трисилікату $O/Si+Al+Ti \leq 2,67$ [21]. Зі збільшенням кислотності в'язкість силікатних розплавів різко зростає, а їх кристалізаційна здатність зменшується. Високі в'язкі кислі розплави зазвичай твердіють з утворенням скла, що підтверджено петрографічним аналізом шліфів. Оксиди CaO , MgO , MnO , FeO , Na_2O , K_2O , TiO_2 знижують в'язкість розплавів. Якщо переважає вміст $(SiO_2 + Al_2O_3)$ порівняно з вмістом $(CaO + MgO + MnO + FeO + Na_2O + K_2O + TiO_2)$ (табл. 1), в'язкість розплаву буде високою, тому утворюється склофаза без її кристалізації.

Таблиця 1 – Масова частка (%) оксидів елементів у частині пустих порід, що не містить карбон, та їх класифікація за системою модулів

Оксид	Пуста порода шахти ім. Свердлова		Пуста порода шахти «Хмельницька»	
	перед спіканням	після спікання	перед спіканням	після спікання
Na_2O	0,60	1,10	0,36	0,67
K_2O	4,82	3,06	2,16	3,55
MgO	1,53	1,10	0,54	2,54
CaO	1,62	2,21	–	–
SiO_2	50,97	42,74	35,28	66,88
Al_2O_3	22,08	39,56	16,18	21,78
SO_3	4,85	–	2,10	–
Cl_2O	0,06	–	0,22	–
TiO_2	1,20	0,60	1,49	0,71
FeO	10,96	9,63 (Fe_2O_3)	2,77	3,87 (Fe_2O_3)
CuO	1,12	–	0,56	–
MnO	0,19	–	–	–
Модулі				
$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	0,43	0,93	0,46	0,33
$M_c = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	2,31	1,08	2,17	3,07
$M_{гг} = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	2,01	4,11	5,84	5,63
$M_{г.з.} = \frac{M}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \cdot SiO_2$	0,65	1,15	0,54	0,38

Зразок спеченої породи із шахти ім. Свердлова має чорний колір. Зразок неоднорідний за мікросструктурою та містить корунд, залістисті шпінелі (магнетит) і склоподібну фазу (рис. 1). Корунд наявний у вигляді ізометричних зерен неправильної форми розміром до 3,2 мм (переважний розмір 0,08–0,8 мм). Деякі зерна корошовані й розділені на більш дрібні призматичні та ізометричні кристали. Ці призматичні кристали корунду спостерігаються у склі; їх довжина досягає 320 мкм, а ширина – 32 мкм. Вміст корунду варіюється від 15 до 20 %.

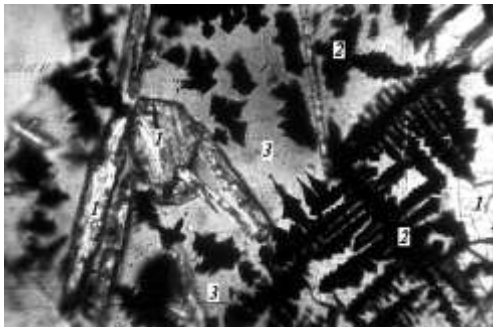


Рис. 1. Зразок спеченої породи з шахти ім. Свердлова: 1 – корунд; 2 – магнетит; 3 – скляна фаза

Скло переважно безбарвне, місцями жовтувате, коричневе, середній показник заломлення $N_{\text{ср.}} \sim 1,525 \pm 0,005$. У склі присутні осади залістистих шпінелів, подібних до складу з магнетитом $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, у вигляді дендритних, скелетних форм та ідіоморфних кристалів розміром 10–40 мкм, максимум 80 мкм. Рідко трапляються тонкі голчасті кристали муліту $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ завдовжки до 150 мкм.

Зразок спеченої породи із шахти «Хмельницька» визначається наявністю чорних фрагментів із коричневими прожилками та скляним блиском. Основна частина зразка (рис. 2) містить скляну фазу від безбарвної до жовтувато-коричневої та жовтувато-зеленої за кольором з $N_{\text{ср.}} \sim 1,535 \pm 0,005$.

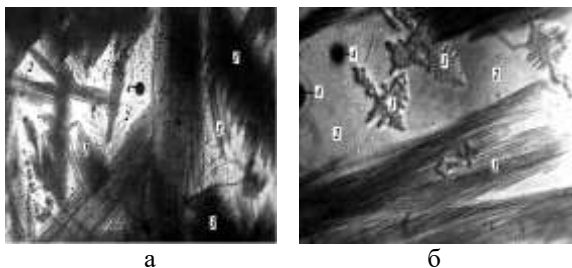


Рис. 2. Зразок спеченої породи шахти «Хмельницька»: 1 – муліт (б – дендритні форми); 2 – скляна фаза; 3 – піроксени; 4 – метал

Скло містить кристали муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) голчастої, витягнуто-призматичної, перистої та іноді субпаралельної форми. Кристали мають довжину до 6 мм (найчастіше 0,2–1,3 мм) і ширину 4–20 мкм. Муліт має показники заломлення: щонайменше $N_p \geq 1,658$, максимум N_g до 1,69. За класифікацією Лодочникова щодо показника заломлення канадського бальзаму, муліт належить до п'ятої групи мінералів за N_p і до шостої за N_g , замість п'ятої групи з показниками $N_p = 1,642$ і $N_g = 1,654$ [22]. Злегка підвищені показники заломлення й середнє значення $N_g - N_p$, що дорівнює 0,032 (замість низького 0,012), вказують на наявність незначної кількості оксидів Fe у твердому розчині. Вміст муліту в різних частинах шлаку варіюється від 5–10 % до 50–60 %.

На деяких ділянках спостерігаються зеленувато-коричневі перисті виділення піроксену: діоксид $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ та геденбергіт $\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot 2\text{SiO}_2$. Також присутні залістисті шпінелі (від герценіту $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ до магнетиту $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Переважають шпінелі, подібні за складом до магнетиту. Вони утворюють ізоморфні кристали розміром до 20 мкм, а також дендритні та скелетні осади. Крім того, наявні сліди (< 1 %) округлих металевих виділень (Fe), подрібненого рутилу (TiO_2) і зерен гематиту. Результати петрографічного дослідження порожніх порід шахти після спікання подано в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати петрографічного дослідження спечених пустих шахт

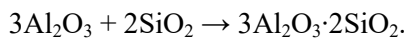
Мінерали, фази	Масова частка, %	
	Шахта ім. Свердлова	Шахта «Хмельницька»
Піроксени (діоксид – геденбергіт)	–	3–5
Залістисті шпінелі (магнетит)	10–15	5–7
Корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)	30–50	–
Муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	traces	30–35
Фаза скла	40–60	55–60

Утворення корунду, муліту й піроксенів зумовлене високотемпературними реакціями: термічним розкладанням мусковіту й клінохлору, утворенням оксидів елементів з їх модифікацією та реакціями між кварцом і утвореними оксидами. Однак достовірна інформация щодо складу високотемпературних

фаз глинистих мінеральних сумішей відсутня. Визнається можливість утворення сполук, відмінних від тих, що утворюються внаслідок випалювання окремих мінералів як первинних фаз [19].

Нагрівання до 800 °C призводить до поступового виділення води з мусковіту, тоді як мінеральна ґратка розширюється. Кристалічна структура руйнується між 940 і 980 °C. За умови 1000 °C із зерен мусковіту утворюється γ - Al_2O_3 й незначна кількість шпінелі. Фаза α - Al_2O_3 з'являється, якщо температура становить 1200 °C [19]. Тип і кількість поліморфних форм Al_2O_3 залежать від температури, тривалості спікання й наявності модифікуючих домішок (Fe). Кількість точкових дефектів у кристалічній структурі Al_2O_3 та його хімічна активність зростають за наявності іонів Fe(II) та Fe(III).

Вторинний муліт може утворюватися під час спікання з утворених оксидів [23] у діапазоні температур 1100–1410 °C [24]



Магнетит $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ утворюється за температури 1400–1600 °C у послідовних реакціях гематит \rightarrow маггеміт \rightarrow магнетит. За температур вищих ніж 500 °C оксиди феруму зазнають термічної дисоціації із втратою оксигену [19]. Діопсид отримують спіканням і плавленням отриманої суміші вапняно-магнезійних і кремнеземних матеріалів.

Потенційне використання пустої породи як перспективного мінерального ресурсу. Виявлення високих концентрацій мінералів слюди й хлориту у відходах шахт є цінним. Світові ресурси слюди не відомі та не визначені на майбутнє. Висока вартість слюди й труднощі в пошуку й розвідці нових родовищ призводять до її заміни синтетичними матеріалами.

Для досліджуваних порід високий вміст кварцових вкраплень, Fe та фрагментація слюдяних пластинок зменшують застосовність слюди як електроізоляційного матеріалу в електротехніці та радіотехніці.

Значний вміст Al_2O_3 (до 40 %) у зразку спеченої породи з шахти ім. Свердлова дає змогу використовувати пусту породу як сировину для виробництва вогнетривів. Вогнетривкість спечених порід, розрахована за формулою [25]

$$o_C = \frac{360 + \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{RO}}{0.228},$$

перебуває в діапазоні від 1660 до 1738 °C, що відповідає вимогам до вогнетривких матеріалів (≥ 1580 °C). Негативним фактором є наявність оксидів Fe, які є небажаними домішками у виробництві вогнетривів. Мікроструктура спечених порід відрізняється від мікроструктури вогнетривів. Спечені зразки містять значну кількість склофази. У структурі вогнетривів тонкі шари склофази розташовані між добре кристалізованими зернами твердого розчину корунду в муліті [26]. Усі перелічені фактори свідчать про неможливість використання спечених порід як вогнетривів.

Пусту породу різного ступеня випалу традиційно застосовують як компонент будівельних розчинів, сировину для виробництва клінкерної цегли, аглопориту й гідравлічних в'язучих речовин [27]. Досліджувані породи не можуть бути використані як наповнювач бетону через наявність незгорілого вугілля [28].

Подібність хімічного складу портландцементного клінкеру та пустої породи уможливорює її застосування у виробництві цементу. Однак необхідно зважати на кілька додаткових факторів: здатність сировини розкладатися на оксиди за відносно низьких температур, відсутність утворення проміжних сполук, що важко розкладаються, швидкість взаємодії компонентів із CaO , потенціальне зниження втрат енергії. Наприклад, низький вміст оксидів лужних металів і Mg в досліджуваних породах не сприятиме утворенню сполук, які перешкоджають утворенню C_3A й C_3S під час випалювання. Зниження втрат енергії прогнозується внаслідок спалювання в печі частини породи, що містить вуглець.

Передбачено, що швидкість взаємодії CaO з глинистими гірськими породами буде вищою, ніж з кварцом або іншими компонентами гірських порід [20]. Крім того, високий вміст Fe_2O_3 сприяє утворенню значної кількості розплаву, за наявності якого вапно краще реагує з іншими мінералами.

Спільна присутність Al_2O_3 та Fe_2O_3 призведе до утворення алюмоферитів Ca зі збільшеним вмістом алюмінату. Це зменшить ступінь термічної дисоціації в ряду $\text{C}_2\text{F} > \text{C}_6\text{AF}_2 > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_6\text{A}_2\text{F} > \text{C}_8\text{A}_3\text{F}$ [20] й уповільнить розкладання C_3S , що спостерігається під час розчинення FeO у ґратці аліту.

Гідравлічну активність порід визначали за кількістю поглиненого вапна CaO . Для цього подрібнений зразок середньої проби гірничої породи (10 г) замочували в розчині CaO з початковою концентрацією 5,63 %. Концент-

рацію CaO контролювали в часі в процесі взаємодії з породою. Результати експерименту подано в табл. 3.

Порівняння отриманих показників з описаними в літературі демонструє, що значення поглинання CaO є високими й перевищують аналогічні показники для обпаленої породи (30 мг/г протягом 30 днів) і силікатних, ферумвмісних обпалених порід (40–130 мг/г вапна) [29].

Таблиця 3 – Активність пустої породи за поглинанням CaO

Породи териконів шахт	Час контакту порід із розчином CaO	Вміст CaO в розчині, %	Абсорбція CaO, %	Сорбційна ємність порід, мг/г
«Хмельницька»	1 доба	3,0	2,63	261,2
	3 доби	2,0	3,63	360,7
ім. Свердлова	1 доба	3,63	2,0	199,0
	3 доби	3,0	2,63	261,2

Значення поглинання вапна визначалися для коротшого періоду (три дні), що необхідно брати до уваги в процесі порівняння з літературними показниками. Поглинальна здатність досліджуваних шахтних порід порівняна з кількісними показниками для кислих гідралічних добавок: трепелу, діатоміту (250–400 мг/г) [20]. Висока поглинальна здатність свідчить про значну гідралічну активність.

Шахтні породи можуть бути використані як активні добавки до цементного клінкеру, який має поглинати не менше ніж 50 мг/г вапна за 30 днів [20].

Гідралічна активність гірських порід визначається не лише вмістом оксидів, але й їх співвідношеннями, що описуються системою модулів. Деякі з цих модулів розраховано й подано в табл. 1. Згідно з модулем активності M_a , досліджені породи визначаються як кислі I класу ($M_a \geq 0,4$).

Для використання відходів у виробництві будівельних матеріалів силікатний модуль M_c повинен мати оптимальні значення 1,7–3,5. Після спікання породи шахти ім. Свердлова значення M_c знижується до 1,08, а породи шахти «Хмельницька» – збільшується до 3,07.

Глиноземистий модуль $M_{гз}$ порід, що застосовуються у виробництві портландцементного клінкеру, має бути в межах 1,0–2,5.

Практично всі зразки порід перевищують оптимальний діапазон.

Відповідно до значення глино-залізного модуля $M_{гз}$ залістисті породи вважаються високоактивними з $M_{гз} > 0,49$. Спечена порода із шахти ім. Свердлова більш активна за спечену породу шахти «Хмельницька».

Високий вміст склофази, наявність Al_2O_3 й Fe_2O_3 , високі значення $M_{гз}$ і $M_{гз,з}$, а також високі гідралічні активності порід роблять їх придатними для використання у виробництві глиноземистого цементу, як коригувальних або активних добавок до портландцементного клінкеру, або у виробництві вапняно-шлакових в'язучих речовин. У виробництві глиноземистого цементу пуста порода може замінити доменні шлаки, що містять алюмінати Ca і Mg з концентрацією до 45 % Al_2O_3 .

У застосуванні пустих порід як коригувальних або активних добавок до портландцементного клінкеру їх необхідно додавати не на стадії помелу клінкеру, а до сировинної суміші перед спіканням. Коригувальні добавки вводяться для регулювання значень модулів M_c , $M_{гз}$ і $M_{гз,з}$. Добавки необхідні, коли сировинна суміш має несприятливі значення модулів або у виробництві цементного клінкеру зі специфічним мінералогічним складом. Якщо додавати досліджувані породи до сировинної суміші, можна регулювати модулі $M_{гз}$ і $M_{гз,з}$. [30].

Порівняння вмісту Al_2O_3 й Fe_2O_3 з [19] продемонструвало, що вміст Al_2O_3 досить високий, тоді як вміст Fe_2O_3 нижчий, ніж у ферумвмісних добавках. Тому ці породи можна рекомендувати як алюмінатно-ферумвмісні добавки у виробництві портландцементного клінкеру.

Висновки

Експериментально визначено оксидний склад вихідних і спечених пустих порід вугільних шахт, а також досліджено їх гідралічну активність. Пусті породи вугільних шахт схарактеризовано за допомогою системи модулів.

Отримані результати вказують на потенційне використання пустих порід вугільних відвалів у виробництві глиноземистого цементу як коригувальних або активних добавок до портландцементного клінкеру й у виробництві вапняно-шлакових в'язучих речовин. Застосування відходів вугільних шахт забезпечить будівельну галузь доступною й недорогою мінеральною сировиною та покращить екологічну ситуацію в регіоні.

У перспективі планується отримати цементний клінкер із використанням супутніх порід вугільних шахт і дослідити його фізико-механічні властивості.

Література

- Gulieva A. A. (2019). Study of the surface properties of minerals in the composition of tails of Dashkesan iron ores. *Azerbaijan Chemical Journal*. 4. 48–53. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2019-4-48-53>
- Savinykh P. A., Kipriyanov F. A., Palitsyn A. V., Zubakin A. S., Korotkov A. N. (2020). A new device for energy recovery from carbon-containing waste and plant biomass. *Petroleum and Coal*. 62. 516–524.
- Syvyj M. J., Ivanov Y. A., Panteleeva N. B., Varakuta O. M. (2023). The problem of rational use of mineral resources and mining waste in the context of sustainable development of regions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1254, 012134. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012134>
- Woźniak Ju., Pactwa K. (2018). Overview of Polish Mining Wastes with Circular Economy Model and Its Comparison with Other Wastes. *Sustainability*. 10. 3994. <https://doi.org/10.3390/su10113994>
- Макеєва Д. О. (2013). Екологічна небезпека породних відвалів та шляхи вирішення проблеми. *Проблеми екології*. 1(31). 43–48.
- Dokoupilova P., Houzar S., Seikora J. (2010). The mineral assemblages at the abandoned burning spoil-heaps in the Rocice-Oslavany coal field. *Czech Republic. Acta Mus. Moraviae, Ski. geol.* 95(1). 121–140.
- Shalamanov V., Pershin V., Shabaev S., Boiko D. (2017). Justification of the optimal granulometric composition of crushed rocks for open-pit mine road surfacing. Paper presented at the E3S web of conferences. *The 1 scientific practical conference "International innovative mining symposium"*. 15. 01006: 6.
- Zhang L. (2013). Production of bricks from waste materials. *A review. Construction and Building materials*. 47. 643–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>
- Klassen V., Borisov I., Manuilov V., Khodykin E. (2017). Theoretical substantiation and efficiency of the use of coal waste as a raw material component in cement technology. *Construction Materials*. 8. 20–21.
- Khobotova E., Ihnatenko M., Hraivoronska I., Kaliuzhna Iu. (2020). Coal Mining Waste as Raw Material for the Construction Industry. *Petroleum and Coal*. 62(3). 1112–1120.
- Misz-Kennan M., Fabiańska M. (2011). Application of organic petrology and geochemistry to coal waste studies. *Intern. J. Coal Geology*. 88. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.07.001>
- Gong D., Song Y., Wei Y., Liu C., Wu Yi., Zhang L., Cui H. (2019). Geochemical characteristics of Carboniferous coaly source rocks and natural gases in the Southeastern Junggar Basin, NW China: Implications for new hydrocarbon explorations. *Intern. J. Coal Geology*, 202. 171–189. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.12.006>
- Kotlyar V. D., Yavruian Kh. S. (2017). Thin issues products of processing waste heaps as raw materials for ceramic wall products. *MATEC Web of Conferences* 129. 05013. 4. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905013>
- Дворкін Л. І., Мироненко А. В. (2019). Будівельні матеріали та виробы із застосуванням промислових відходів. Рівне: НУВГП. 298.
- Giménez-García R., de la Villa Mencía R., Rubio V., Frías M. (2016). The transformation of coal-mining waste minerals in the pozzolanic reactions of cements. *Minerals*. 6. 64–74. <https://doi.org/10.3390/min6030064>
- Khobotova E., Ihnatenko M., Kaliuzhna Iu., Hraivoronska I. (2021). Evaluation of radiation security of coal-mining and thermal power waste products. *Petroleum and Coal*. 63(2). 517–524.
- Lyalyuk V. P., Shmeltser E. O., Kassim D. A., Lyakhova I. A. (2020). Influence of the properties raw coal materials and coking technology on the granulometric composition of coke. *Message 2. Granulometric composition of the coke as a function of the coal batch properties. Petroleum and Coal*. 62(2). 309–315.
- Хоботова Е., Уханьова М. (2010). Методика визначення корисних властивостей промислових відходів з метою їх утилізації в якості технічних матеріалів. Свідоцтво про реєстрацію авторського права № 34221 UA.
- Дворкін Л. І. (2019). Будівельні в'язучі матеріали. Рівне: НУВГП. 622.
- Болдирев А. С., Золотов П. П. (1989). Будівельні матеріали. Довідник. 568 с.
- Нестеровський В. А., Бортник С. Ю., Погорільчук Н. М., Ковтонюк О. В. (2011). Основи мінералогії та петрографії. Київ: Київський університет. 448.
- Свєшніков К. І., Побережська І. В., Дорошенко Ю. П. (2010). Магматичні породи та породні сполучення: петрографія, петрологія, методи досліджень. Львів: Вид. центр ЛНУ імені Івана Франка. 426.
- Корнілович Б. Ю., Андрієвська О. Р., Племянніков М. М., Спасьонова Л. М. (2013). Фізична хімія кремнезему і нанодисперсних силікатів. Київ: Освіта України. 178.
- Павлов Г. Г. (2014). Петрографія: підручник. Київ: Київський університет. 527.
- Металічні і неметалічні корисні копалини України: в 2 т. Неметалічні корисні копалини. Київ; Львів, 2006. Т. 2.
- Routschka G. (2004). Pocket manual refractory materials: basics structures-properties. Essen: Vulkan-Verlag. 512.

27. Чоботько І. І. (2022) Створення класифікації способів використання відходів вуглевидобутку. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*. 24. 128–141.
28. Митрохин О. В. (2019). Петрографія технічного каміння: навчальний посібник. Київ: Київський університет. 110.
29. Сокольников В. Ю., Токарчук В. В., Свідерський В. А. (2015). Використання термооброблених відвальних порід вуглевидобування у виробництві цементу. *Technology audit and production reserves*. 6/4(26). 55–58.
30. Книш І. Б. (2006) Перспективи використання відходів вугільної промисловості Львівщини як нової мінеральної сировини. *Вісник Львів. ун-ту. Серія геологічна*. 20. 111–123.

Хоботова Еліна Борисівна, професор, д-р хім. наук, професор кафедри хімії та хімічної технології Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Україна,

тел. (095)880-44-19,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6377-5186>,
elinahobotova@gmail.com;

Даценко Віта Василівна, доцент, канд. хім. наук, доцент кафедри хімії та хімічної технології Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Україна,

тел. (097)880-92-95,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8331-8863>,
dacenkovital4@gmail.com.

References

1. Gulieva A. A. (2019). Study of the surface properties of minerals in the composition of tails of Dashkesan iron ores. *Azerbaijan Chemical Journal*. 4. 48–53. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2019-4-48-53>
2. Savinykh P. A., Kipriyanov F. A., Palitsyn A. V., Zubakin A. S., Korotkov A. N. (2020). A new device for energy recovery from carbon-containing waste and plant biomass. *Petroleum and Coal*. 62. 516–524.
3. Syvyj M. J., Ivanov Y. A., Panteleeva N. B., Varakuta O. M. (2023). The problem of rational use of mineral resources and mining waste in the context of sustainable development of regions. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1254, 012134. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012134>
4. Woźniak Ju., Pactwa K. (2018). Overview of Polish Mining Wastes with Circular Economy Model and Its Comparison with Other Wastes. *Sustainability*. 10. 3994. <https://doi.org/10.3390/su10113994>
5. Makeieva D. O. (2013). Ekologichna nebezpeka porodnykh vidvaliv ta shliakhy vyrishennia problemu. *Problemy ekolohii*. 1(31). 43–48.
6. Dokoupilova P., Houzar S., Seikora J. (2010). The mineral assemblages at the abandoned burning spoil-heaps in the Rocice-Oslavany coal field. *Czech Republic. Acta Mus. Moraviae, Ski. geol.* 95(1). 121–140.
7. Shalamanov V., Pershin V., Shabaev S., Boiko D. (2017). Justification of the optimal granulometric composition of crushed rocks for open-pit mine road surfacing. Paper presented at the E3S web of conferences. *The 1 scientific practical conference "International innovative mining symposium"*. 15. 01006: 6.
8. Zhang L. (2013). Production of bricks from waste materials. *A review. Construction and Building materials*. 47. 643–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>
9. Klassen V., Borisov I., Manuilov V., Khodykin E. (2017). Theoretical substantiation and efficiency of the use of coal waste as a raw material component in cement technology. *Construction Materials*. 8. 20–21.
10. Khobotova E., Ihnatenko M., Hraivoronska I., Kaliuzhna Iu. (2020). Coal Mining Waste as Raw Material for the Construction Industry. *Petroleum and Coal*. 62(3). 1112–1120.
11. Misz-Kennan M., Fabiańska M. (2011). Application of organic petrology and geochemistry to coal waste studies. *Intern. J. Coal Geology*. 88. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.07.001>
12. Gong D., Song Y., Wei Y., Liu C., Wu Yi., Zhang L., Cui H. (2019). Geochemical characteristics of Carboniferous coaly source rocks and natural gases in the Southeastern Junggar Basin, NW China: Implications for new hydrocarbon explorations. *Intern. J. Coal Geology*, 202. 171–189. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.12.006>
13. Kotlyar V. D., Yavruian Kh. S. (2017). Thin issues products of processing waste heaps as raw materials for ceramic wall products. *MATEC Web of Conferences 129*. 05013. 4. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905013>
14. Dvorkin L. I., Myronenko A. V. (2019). Budivelni materialy ta vyroby iz zastosuvanniam promyslovykh vidkhodiv. Rivne: NUVHP. 298.
15. Giménez-García R., de la Villa Mencía R., Rubio V., Frías M. (2016). The transformation of coal-mining waste minerals in the pozzolanic reactions of cements. *Minerals*. 6. 64–74. <https://doi.org/10.3390/min6030064>
16. Khobotova E., Ihnatenko M., Kaliuzhna Iu., Hraivoronska I. (2021). Evaluation of radiation security of coal-mining and thermal power waste products. *Petroleum and Coal*. 63(2). 517–524.
17. Lyalyuk V. P., Shmeltser E. O., Kassim D. A., Lyakhova I. A. (2020). Influence of the properties raw coal materials and coking technology on the granulometric composition of coke. Message 2. Granulometric composition of the coke as a function of the coal batch properties. *Petroleum and Coal*. 62(2). 309–315.
18. Khobotova E., Ukhanova M. (2010). Metodyka vyznachennia korysnykh vlastyvostei promyslovykh vidkhodiv z metoiu yikh utylizatsii v yakosti tekhnichnykh materialiv. *Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava № 34221 UA*.
19. Dvorkin L. I. (2019). Budivelni viazhuchi materialy. Rivne: NUVHP. 622.

20. Boldyriev A. S., Zolotov P. P. (1989). Budivelni materialy. Dovidnyk. 568 c.
21. Nesterovskiy V. A., Bortnyk S. Iu., Pohorilchuk N. M., Kovtoniuk O. V. (2011). Osnovy mineralohii ta petrografii. Kyiv: Kyivskiy universytet. 448.
22. Svieshnikov K. I., Poberezhska I. V., Doroshenko Yu. P. (2010). Mahmatychni porody ta porodni spoluchennia: petrografia, petrolohiia, metody doslidzhen. Lviv: Vyd. tsentr LNU imeni Ivana Franka. 426.
23. Kornilovych B. Iu., Andriievskia O. R., Plemianikov M. M., Spasonova L. M. (2013). Fizychna khimiia kremnezemu i nanodispersnykh sylivativ. Kyiv: osvita Ukrainy. 178.
24. Pavlov H. H. (2014). Petrografia: pidruchnyk. Kyiv: Kyivskiy universytet. 527.
25. Metalichni i nemetalichni korysni kopalyny Ukrainy: 2(2). Nemetalichni korysni kopalyny. Kyiv; Lviv. 2006.
26. Routschka G. (2004). Pocket manual refractory materials: basics structures-properties. Essen: Vulkan-Verlag. 512.
27. Chobotko I. I. (2022) Stvorennia klasyfikatsii sposobiv vykorystannia vidkhodiv vuhlevydobutku. *Fizyko-tekhnichni problemy hirnychoho vyrobnytstva*. 24. 128–141.
28. Mytrokhyn O. V. (2019). Petrografia tekhnichnoho kaminnia: navchalnyi posibnyk. Kyiv: Kyivskiy universytet. 110.
29. Sokoltsov V. Iu., Tokarchuk V. V., Sviderskyi V. A. (2015). Vykorystannia termoobroblynykh vidvalnykh porid vuhlevydobuvannia u vyrobnytstvi tsementu. *Technology audit and production reserves*. 6/4(26). 55–58.
30. Knysh I. B. (2006) Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv vuhilnoi promyslovosti Lvivshchyny yak novoi mineralnoi syrovyny. *Visnyk Lviv. un-tu. Serii heolohichna*. 20. 111–123.

Co-Minerals of coal mining as a promising mineral resource

Problem. Waste rock from certain industrial sectors accumulates in spoil heaps and slag heaps, occupying large areas and posing a threat to the surrounding environment. When these compounds are leached out, they contaminate the soil and surface water.

Goal. The aim of the study is to investigate the petrographic and hydraulic properties of overburden from mines in the Eastern Donbas and to assess the potential for their use in the production of building materials. **Methodology.** The elemental composition of the rock samples was determined using INCA electron probe microanalysis on a JSM-820 scanning electron microscope. Petrographic examination of the samples was carried out on thin sections using MIN-8

and Nu-2E microscopes under transmitted light. The hydraulic activity of the overburden rocks was determined by the amount of absorbed CaO. Results. The resource value of unburned coal rocks of the Eastern Donbas mines was substantiated. These rocks contain amorphous phases and a crystalline part, in which minerals muscovite, quartz and clinocllore are presented. The rocks are classified as ultra-acidic. Sintered coal rocks consist of a glass phase in which are distributed crystals of minerals: ferruginous spinels, mullite, pyroxenes (diopside and hedenbergite), which were formed by high-temperature reactions. **Originality.** The potential for using coal-bearing rocks in cement production is confirmed by the similarity of their oxide composition. The high Fe_2O_3 content promotes the formation of a melt, in which lime reacts better with other minerals. The combined presence of Al_2O_3 and Fe_2O_3 leads to the formation of Ca aluminoferrites with an increased aluminate content. **Practicalvalue.** The high content of glass phase, the presence of Al_2O_3 and Fe_2O_3 , excellent hydraulic properties of the rocks make them suitable for use in the production of lime-slag binders, aluminous cement and as corrective or active additives to Portland cement clinker. By introducing rocks into the raw mix, the Mal and Mc.f. modulus can be adjusted.

Keywords: Coal mining rock, Petrographic analysis, Hydraulic activity, Modulus classification, Building materials.

Khobotova Elina, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of technology of roadbuilding materials and chemistry, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6377-5186>, tel. (095)880-44-19,

elinahobotova@gmail.com;

Datsenko Vita, PhD, Associate Professor, Department of technology of road-building materials and chemistry Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8331-8863>, tel. (097)880-92-95,

dacenkovita14@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції / Received: 15.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 25.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.