

УДК 622.278: 622.85

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-26>

ТЕРМОХІМІЧНА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ ВУГЛЕВИДОБУТКУ: ВИКЛИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ

Саїк Павло Богданович,

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри гірничої інженерії та освіти
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-7758-1083

Лисий Назар Романович,

аспірант кафедри екологічної безпеки
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
ORCID ID: 0009-0006-7050-0395

Дмитрук Олена Олександрівна,

старший викладач кафедри нафтогазової інженерії та буріння
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-6311-6252

Лозинський Василь Григорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої інженерії та освіти
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-9657-0635

У роботі досліджено актуальну науково-прикладну проблему термохімічної утилізації відходів вуглевидобутку в умовах зростання обсягів їх накопичення та посилення екологічних ризиків у гірничодобувних регіонах. Зазначено, що попри глобальні тенденції декарбонізації, вугілля й надалі відіграє значну роль у світовому енергетичному балансі, що зумовлює формування великих масивів техногенних відходів, зокрема породних відвалів вугільних шахт. Особливу увагу приділено газифікації як одному з найбільш перспективних напрямів термохімічної переробки високозольних відходів, здатному забезпечити зменшення їх обсягів та одержання енергетично цінних газоподібних продуктів.

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу зольності відходів вуглевидобутку на вихід та компонентний склад горючих складників генераторного газу. Для цього проби відходів з породного відвалу подрібнювали до однорідного гранулометричного складу та піддавали експериментальному визначенню зольності методом повільного озолення. Термохімічну утилізацію відходів досліджували на експериментально-промисловому комплексі, що реалізує поєднання процесів низькотемпературного піролізу та подальшої газифікації твердого залишку з поданням водяної пари, унаслідок чого отримували генераторний газ, склад якого аналізували за основними компонентами.

Визначено, що зольність досліджуваних відходів перебуває у межах 70,3–92,1 %, що істотно впливає на її реакційну здатність в умовах газифікації. Установлено, що зі зростанням зольності відходів концентрація горючих компонентів CO , H_2 і CH_4 у складі генераторного газу зменшується за експоненціальними залежностями, при цьому його теплотворна здатність знижується з 3,46 до 1,21 МДж/м³. Отримані результати підтверджують доцільність урахування зольності як ключового параметра при оптимізації режимів газифікації відходів вуглевидобутку та свідчать про перспективність термохімічної утилізації як складника формування циркулярних виробничих циклів у вугільній галузі.

Ключові слова: відходи вуглевидобутку, комплекс з переробки відходів, газифікація, зольність, генераторний газ, теплотворна здатність.

Saik Pavlo, Lysyi Nazar, Dmytruk Olena, Lozynskiy Vasyl. Thermochemical utilization of coal mining waste: challenges and technological prospects

The manuscript addresses a relevant scientific and applied problem related to the thermochemical utilization of coal mining waste under conditions of its increasing accumulation and growing environmental risks in coal-producing regions. Despite global decarbonization trends, coal remains a significant contributor to the global energy balance, resulting in the formation of substantial volumes of technogenic waste, particularly waste rock dumps from coal mining operations. In this context, gasification is considered one of the most promising approaches to

the thermochemical conversion of high-ash waste, as it enables both waste volume reduction and the production of energy-rich gaseous products.

This study aims to identify the influence of ash content in coal mining waste on the yield and component composition of the combustible fraction of producer gas. For this purpose, waste samples collected from a spoil heap were crushed to obtain a uniform particle size distribution and subjected to ash content determination using a slow ashing method in a muffle furnace. Thermochemical conversion was carried out using an experimental-industrial installation that combines low-temperature pyrolysis with subsequent gasification of the solid residue using steam injection. The resulting producer gas was analyzed to determine the concentrations of its main components.

The results indicate that the ash content of the investigated waste varies within the range of 70.3 – 92.1%, which has a substantial effect on its reactivity under gasification conditions. It was established that an increase in ash content leads to an exponential decrease in the concentrations of combustible components, such as CO, H₂, and CH₄, in the producer gas, accompanied by a reduction in its lower heating value from 3.46 to 1.21 MJ/m³. The obtained findings confirm the importance of considering ash content as a key parameter when optimizing gasification regimes for coal mining waste. Moreover, the results demonstrate the potential of thermochemical utilization as an integral element of circular production systems in the coal industry.

Key words: coal mining waste, waste processing complex, gasification, ash content, producer gas, calorific value.

Вступ. Вугілля протягом двох століть залишалося основою індустріального розвитку, забезпечуючи енергетичні потреби промисловості, теплової генерації та металургійного сектору більшості країн світу. Навіть у XXI столітті, попри активний перехід розвинутих економік до низьковуглецевих технологій, глобальне споживання вугілля продовжує залишатися на історично високих рівнях, а в низці держав його видобуток постійно зростає. Згідно з даними [1], світове споживання вугілля в період з 2000 до 2026 року показує тенденцію до зростання, що пояснюється кількома ключовими факторами: економічний розвиток у країнах, що розвиваються, збільшення енергетичних потреб та обмеження інвестицій в альтернативні джерела енергії (рис. 1).

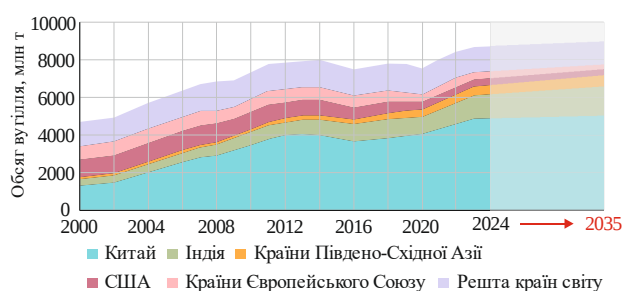


Рис. 1. Тенденція світового споживання вугілля

У 2022 році світове споживання вугілля перевищило 8,3 млрд т [2]. Ба більше, країни Азійсько-Тихоокеанського регіону (Китай, Індія, Індонезія, В'єтнам) формують понад 75 % світового попиту на вугілля, що зумовлює подальше збільшення обсягів техногенних відходів [3].

Водночас триває глобальний дискурс щодо впливу вугільної енергетики на кліматичні зміни. Міжурядова група експертів зі змін клімату (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate

Change) виокремлює вугілля як один із найбільших джерел антропогенних викидів вуглекислого газу, що спонукає багато країн розробляти стратегії поступового відмовлення від його використання. Проте повний і швидкий відхід від вугілля є обмеженим для країн із перехідною економікою, зокрема України, Польщі, Чехії, Туреччини, Південно-Африканської Республіки, де вугілля залишається елементом енергетичної безпеки та соціально-економічної стабільності регіонів [4–6].

Попри те що дискусії щодо майбутнього вугілля здебільшого концентруються на питаннях енергетики та декарбонізації, не менш важливою є проблема накопичення та управління відходами вуглевидобутку. Саме ця категорія техногенних матеріалів становить один із найбільших за обсягом потоків промислових відходів у світі. За оцінками дослідників, у світі накопичено мільярди тонн відходів видобувної діяльності, включно із шахтними та відвальними породами: щорічне утворення твердих відходів досягає мільярдів т, а загальна маса може сягати майже 19 млрд т до 2025 року [7]. У контексті вугільної промисловості великі масиви відходів характерні для традиційних видобувних регіонів у Європі, що створює значні техногенні ландшафти [8].

Україна посідає одне з провідних місць у Європі за масштабами накопичення відходів вуглевидобутку, що зумовлено тривалим інтенсивним розвитком вугільної промисловості в східних і центральних регіонах країни. У межах Донецького та Львівсько-Волинського вугільних басейнів сформувалися значні масиви породних відвалів, які займають великі площі та істотно трансформують природні ландшафти. Зокрема, за даними досліджень Західного Донбасу, лише в межах Дніпропетровської області сформовано 11 породних

відвалів, у яких накопичено понад 100 млн т пустої породи загальною площею понад 200 га, що свідчить про значні локальні масштаби техногенного навантаження [9]. Загалом, у вугільнодобувних регіонах України за десятиліття експлуатації шахт накопичено мільярдні обсяги гірничих відходів. Узагальнені оцінки свідчать, що за понад 50 років у вугільних регіонах України акумульовано понад 25 млрд т гірничих відходів, що підтверджує масштабність проблеми та актуальність пошуку технологій їх утилізації і рекультивації [10]. Детальна інвентаризація породних відвалів засвідчує їх значну кількість, різноманітність морфологічних характеристик та підвищену екологічну небезпеку, зокрема внаслідок процесів самозаймання, ерозії та пиловиділення [11].

Одним із найбільш поширених небезпечних процесів є самозаймання вуглецевмісної частини породи, що призводить до тривалого горіння териконів з утворенням великої кількості чадного газу, оксидів азоту й сірки, а також токсичних ароматичних вуглеводнів [12; 13]. Такі процеси негативно впливають на атмосферне повітря й здоров'я населення, підвищують ризики вибухів і створюють термічні аномалії в районі техногенних масивів.

Іншим небезпечним аспектом є утворення кислотного дренажу вод, що містять іони сульфату, заліза, марганцю, важкі метали тощо. Кислотний дренаж поступово вимиває токсичні елементи з породи, забруднюючи ґрунтові й поверхневі води [14]. Цей процес може тривати десятиліттями та має довготривалі наслідки для екосистем.

Відвали породи також сприяють пиловому забрудненню, оскільки дрібнодисперсні частинки легко переносяться вітром. Це погіршує якість повітря й збільшує ризики респіраторних захворювань у населення прилеглих територій [15; 16]. Усе це робить проблему відходів вуглевидобутку однією з найгостріших у вугільних регіонах.

Попри значні екологічні ризики, на сьогодні відходи вуглевидобутку розглядають як цінну вторинну сировину. Це зумовлено тим, що вони можуть містити до 30 % залишкового вуглецю, мінеральні компоненти, які придатні для виробництва будівельних матеріалів, а домішки можуть бути перетворені в корисні продукти термохімічними методами.

Дослідження показують, що різні технології перетворення відходів дають змогу отримувати цінні продукти: термічні процеси газифікації допомагають перетворювати органічні та промислові відходи в синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2$), який є універсальною сировиною для подальшої

хімічної переробки [17]. Водночас органічні та вуглецевмісні відходи можуть бути використані як попередники для виготовлення активованого вугілля й пористих вуглецевих сорбентів із високою площею поверхні, придатних для очистки газів або води та використання в енергетичних системах [18; 19].

Сьогодні країни ЄС, Велика Британія, Китай та Австралія активно впроваджують технології переробки вуглевидобувних відходів у межах переходу до циркулярної економіки, що передбачає повторне використання техногенних ресурсів [20–22]. У цьому контексті термохімічна утилізація відіграє ключову роль, оскільки дає змогу зменшити обсяг накопичених відходів, зменшити викиди парникових газів, підвищити енергетичну автономність регіонів та мінімізувати екологічні ризики.

Термохімічна переробка вже активно застосовується для утилізації біомаси, відходів полімерів, органічної промислової сировини та твердих побутових відходів. Промисловий досвід доводить, що адаптація цих технологій до потреб вугільної галузі є реалістичною та економічно перспективною [23; 24]. Перевага термохімічної переробки полягає в її універсальності. Процеси газифікації і піролізу можуть застосовуватися для матеріалу з високою зольністю, різним гранулометричним складом та складною органо-мінеральною структурою. Так, термохімічні технології стають одним із небагатьох напрямів, здатних забезпечити як комплексне використання енергетичного потенціалу відходів вуглевидобутку, так і їх глибоку мінеральну трансформацію з отриманням продуктів, що розширює можливості формування циркулярних виробничих циклів та мінімізує обсяг техногенних відходів, які підлягають довготривалому зберіганню.

Дослідження термохімічних процесів утилізації вуглецевмісних матеріалів мають багаторічну історію, однак інтенсивний розвиток цього напрямку почався лише протягом останніх двох десятиліть. Це зумовлено глобальним зміщенням підходів від традиційного спалювання вугілля до технологій термохімічної конверсії, здатних забезпечувати значно вищу енергоефективність і ширший спектр продуктів. Термохімічна утилізація відходів вуглевидобутку стала предметом інтересу наукової спільноти через змінний компонентний склад породи, а саме наявність значної залишкової фракції вуглецю, мінеральних домішок і широкого діапазону органічних сполук.

Перші дослідження термохімічних властивостей вугільної породи були пов'язані

з моделюванням процесів самозаймання териконів, де температурні градієнти та фізико-хімічні реакції фактично формували природний аналог газифікації через низькотемпературне окиснення з виділенням тепла і газових продуктів [25; 26]. У 1980–1990-х роках активно вивчали можливості переробки та спікання вугільної породи й інших гірничовидобувних відходів для отримання будівельних матеріалів, а сучасні дослідження демонструють практичні застосування таких підходів, зокрема у виробництві керамічних плиток із відходів [27]. Проте лише модернізація науково-дослідних установок у 2000-х роках дала змогу системно вивчити кінетичні властивості породи та адаптувати підходи газифікації і піролізу до техногенних відходів.

Сучасні дослідження демонструють, що основними недоліками застосування термохімічних технологій до відходів вуглевидобутку є їх висока зольність, наявність глинистих мінералів, варіативність складу та складна реакційна активність органічних компонентів [28]. Однак саме ці особливості роблять їх перспективними для комбінованих схем переробки, у яких різні фракції матеріалу можуть бути задіяні в окремих процесах.

Газифікація відходів дає змогу отримувати генераторний газ, що у своєму складі містить такі горючі гази, як CO, H₂ та CH₄ [29; 30]. Такий газ може використовуватися як: енергетичний газ для котлів, газових турбін та двигунів внутрішнього згоряння; компонент для синтезу рідких палив у процесах синтезу Фішера – Тропша, хімічна сировина для виробництва аміаку, метанолу тощо.

Піроліз, своєю чергою, дає змогу отримувати тверді продукти (коксоподібні матеріали), рідку фракцію (піролізні олії) та газову фракцію з високою калорійністю. Процеси піролізу відходів вуглевидобутку вже опрацьовані в лабораторних масштабах у Китаї, Польщі та Україні, і демонструють високу ефективність за температур 450–650 °C [31]. Водночас газифікація відходів вуглевидобутку ґрунтується на низці основних хімічних реакцій: реакції вуглецю з киснем, вуглецю з діоксидом вуглецю, парової газифікації, водогазової конверсії та реакції метанування. Їх інтенсивність залежить від температури, тиску, співвідношення реагентів, гранулометрії та мінеральної частки матеріалу.

Ендотермічні реакції ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$; $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) активуються за температур понад 750–800 °C. Екзотермічні реакції часткового окиснення ($C + 0,5O_2 \rightarrow CO$; $C + O_2 \rightarrow CO_2$) забезпечують необхідний тепловий баланс процесу. Оптимальний діапазон температур для

газифікації породних відходів зазвичай становить 850–1100 °C, залежно від фракції та зольності [32].

Особливу увагу приділяють впливу мінеральної частини породи на швидкість газифікації. Дослідження показують, що глинисті мінерали, як-от каолінит, уповільнюють реакційну здатність через утворення захисних оболонок на частинках вуглецю, тоді як деякі мінерали заліза, кальцію або калію, навпаки, є каталізаторами реакцій газифікації [33].

Порівняння технологій газифікації та піролізу вказує на різну спрямованість технологічних процесів. Газифікація характеризується високою енергетичною ефективністю та універсальністю продуктів, тоді як піроліз спрямований на одержання твердої і рідкої фракції із хімічним потенціалом. На сьогодні простежується доцільність застосування комбінованих технологічних схем, зокрема попереднього піролізу з подальшою газифікацією твердого залишку, а також спільної газифікації відходів вуглевидобутку та біомаси з метою зменшення викидів CO₂. Такі підходи забезпечують вищу екологічну й економічну ефективність, що робить їх перспективними для промислового впровадження. Проте, попри досягнутий прогрес у напрямках утилізації відходів вуглевидобутку, низка принципово важливих аспектів залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, обмеженням є рівень моделювання кінетики термохімічних процесів саме для породних відходів, на відміну від вугілля як базової сировини; недостатньою залишається кількість експериментальних досліджень із використанням реальних природних матеріалів, особливо з родовищ Західного Донбасу та Львівсько-Волинського вугільного басейну; не повною мірою вивчено питання стабільності процесів під час переходу від лабораторних установок до промислових масштабів; а також відсутні комплексні оцінки економічної ефективності термохімічних схем утилізації, що суттєво обмежує можливість їх практичного впровадження.

Так, **метою** роботи є дослідження термохімічної утилізації відходів вуглевидобутку на основі встановлення закономірностей впливу їх зольності на вихід горючих газів та визначення оптимальних умов їх газифікації для підвищення енергетичної ефективності процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі основні завдання: дослідити фізико-хімічні характеристики відходів вуглевидобутку, що акумульовані в породних відвалах; установити закономірності виходу горючих генераторних газів при газифікації відходів вуглевидобутку залежно від їх зольності.

Методика та методи дослідження. Фізико-хімічні характеристики відходів вуглевидобутку досліджували в лабораторних умовах шляхом експериментального визначення показників зольності з використанням методів технічного аналізу, зокрема методу повільного озолення відповідно до стандартів ISO 1171 та ГОСТ 11022-95.

Попередньо відібрані проби відходів із породного відвалу шахти «Великомостівська» піддавали подрібненню до однорідного гранулометричного складу. Із підготовленого матеріалу відбирали наважки масою, які поміщали у фарфорові човники. Озолення зразків проводили в муфельній печі з електричним обігрівом SNOL 8.2/1100 шляхом повільного додавання наважок. Човники з наважками встановлювали в муфельну піч за кімнатної температури. Далі температуру в печі підвищували поетапно до 250 °С протягом 30 хв, у наступні 30 хв до 500 °С, після чого протягом 60 хв температуру доводили до (815 ± 15) °С.

Після досягнення температури (815 ± 15) °С зразки витримували за цих умов протягом 60 хв для повного вигорання органічного складника. По завершенню прожарювання човники виймали з муфельної печі та охолоджували протягом 10 хв. Зважування озолених зразків виконували на аналітичних вагах AXIS BTU2100.

Зольність досліджуваної проби визначали за формулою:

$$A^a = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\%,$$

де m_1 – маса човника, г; m_2 – маса човника з пробой, г; m_3 – маса човника із зольним залишком, г.

Дослідження процесів термохімічної утилізації відходів вуглевидобутку проводили на експериментально-промисловому комплексі з переробки відходів, розробленому ТзОВ «Еко Енергетична Альтернатива». Загальний вигляд комплексу наведено на рис. 2.

Принцип роботи комплексу ґрунтується на поєднанні процесів низькотемпературного піролізу вуглецевмісних відходів із подальшою газифікацією утвореного твердого залишку. Відходи гірничого виробництва завантажуються в реторту об'ємом 0,2 м³. У верхній частині реторти передбачені патрубки для відведення парової фази та виводу газової суміші. Герметизація реторт здійснювалася за допомогою кришок із паранітовими прокладками, що забезпечувало стабільність технологічного режиму.

У кришках реторт розміщено три трубки: глуха трубка використовувалася як захисний чохол



Рис. 2. Загальний вигляд комплексу з переробки відходів

для термопари; трубка, що доходить майже до дна реторти, призначалася для подачі водяної пари; третя трубка слугувала для відведення газової суміші. Реторти встановлювали в печі та прогрівали топковими газами, які рухалися по секціях печі та відводилися через димохід. Топкові гази на етапі запуску модуля утворюються внаслідок спалювання палива в топках печі, тоді як у робочому режимі модуля топковими газами є продукти згоряння газової суміші, що виділяється з реторт у процесі піролізу.

Процес газифікації відходів вуглевидобутку реалізується поетапно та починається із завантаження підготовлених відходів у реторту. Після завантаження реторту переміщують у відповідну секцію печі, де здійснюється її встановлення та герметизація. Далі проводиться її з'єднання із трубопроводами подачі пари та відведення газу з наступним поданням повітря, що є необхідним для формування реакційного середовища. На наступному етапі проводиться подання води в паровий контур, де вона перетворюється на водяну пару, після чого відбувається подання пари безпосередньо в реторту. Саме на цій стадії інтенсифікуються основні реакції між вуглецем, водяною парою та киснем, що призводить до утворення генераторного газу, основними компонентами якого є CO, H₂, CO₂ та CH₄.

Після завершення газифікації здійснюється від'єднання реторти від трубопроводів подання пари та газу, а сама реторта переміщується на охолодження. Далі вона знову переміщується в технологічному циклі або, за необхідності, переводиться на позицію іншої реторти, що забезпечує безперервність роботи комплексу.

Результати. У межах виконання завдання з дослідження фізико-хімічних характеристик

відходів вуглевидобутку, складованих у відвалах шахти «Великомостівська», проведено комплекс досліджень, спрямованих на встановлення зольності цих відходів. Визначення цього показника є важливим, оскільки зольність відображає співвідношення мінерального та органічного складників породної маси, а також характеризує вміст залишкового вугілля, придатного до подальшої газифікації. При цьому слід зазначити, що з метою забезпечення коректного визначення зольності проби відбирали з різних зон терикону, що дало змогу сформувати репрезентативну вибірку та підвищити достовірність отриманих результатів. Оскільки в процесах газифікації передбачається залучення відходів гірничого виробництва загалом, незалежно від їх гранулометричного складу, під час досліджень враховувалася інтегральна характеристика породної маси без попереднього фракційного розділення, що відповідає реальним умовам практичного застосування технології. Отримані значення зольності надалі використовують як базовий параметр для оцінки енергетичного потенціалу відходів при їх газифікації. Дані щодо зміни зольності досліджуваних проб гірничої породи наведено на рис. 3.

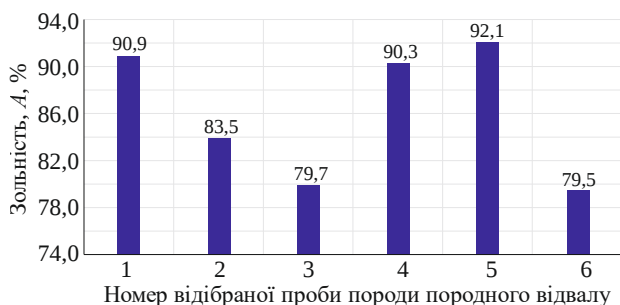


Рис. 3. Дані щодо зміни зольності досліджуваних проб породного відвалу

Аналіз наведених даних указує на те, що зольність досліджуваних проб перебуває в межах 79,5–92,1 %, що свідчить про переважання мінерального складника у відходах терикону. При цьому розбіжність між результатами, отриманими для різних наважок, не перевищує 0,88–1,1 %, що підтверджує однорідність досліджуваного матеріалу та достатню репрезентативність відібраних проб.

У подальшому в межах експериментальних досліджень відібрані проби були піддані газифікації з метою комплексної оцінки їх термохімічної активності та визначення технологічної доцільності використання відходів гірничого виробництва. Здійснення процесу газифікації дало змогу дослідити особливості

перетворення високозольної породної маси в умовах підвищених температур (>500 °C), установити інтенсивність участі залишкової вуглецевої складової в реакціях окиснення та відновлення, а також схарактеризувати утворення газоподібних продуктів, що є визначальним для подальшого обґрунтування параметрів процесу. Проведення експериментальних досліджень передбачало газифікацію шести проб відходів вуглевидобутку. При цьому для кожної проби виконано по три повторні експерименти, що дало змогу оцінити відтворюваність результатів, зменшити вплив випадкових похибок та забезпечити достатню статистичну надійність отриманих даних.

Фотофікацію зольного залишку в реторті промислового комплексу наведено на рис. 4, а усереднені дані щодо параметрів сировини, що газифікується, та зольного залишку – у табл. 1.



Рис. 4. Загальний вигляд зольного залишку у реторті комплексу з переробки відходів

Таблиця 1
Параметри сировини, що газифікується та зольного залишку

№ проби	Маса сировини, кг		Вологість, %	Зольність, %
	До газифікації	Після газифікації		
1	61,3	44,6	11,8	85,9
2	56,5	37,0	14,5	74,8
3	54,7	33,8	12,4	70,3
4	58,3	40,4	8,8	78,9
5	55,9	35,9	13,6	73,2
6	62,3	47,1	10,5	89,1

При завантаженні в реторту сировини з породного відвалу масою 54,7–62,3 кг за

вологості 8,8–14,5 % маса зольного залишку становила 33,8–47,1 кг, що відповідає зольності 70,3–89,1 % у перерахунку на суху масу. Збіжність між результатами лабораторних вимірювань і даними промислових досліджень щодо зольності відходів становить 5,5–20,5 %, що свідчить про загальну узгодженість отриманих результатів з урахуванням масштабного ефекту та природної неоднорідності породної маси.

За результатами проведеної газифікації визначено зміну компонентного складу генераторного газу на виході з реторти комплексу з утилізації відходів. Для аналізу використовували значення об'ємних часток основних компонентів горючого генераторного газу CO, H₂ та CH₄. Розрахунок теплоти згоряння генераторного газу виконано за правилом адитивності, згідно з яким теплота згоряння газової суміші визначається сумою внесків її горючих складників з урахуванням їхніх часток у суміші [34].

Отримані результати дали змогу кількісно і якісно схарактеризувати вплив режиму газифікації на склад і теплотворну здатність генераторного газу залежно від вихідної сировини та можуть бути використані для подальшої оптимізації процесу (вибору співвідношення окисник / паливо, подання пари, температурного режиму, тривалості газифікації). Узагальнені значення зміни компонентного складу горючих газів і розрахованої теплоти згоряння наведено на рис. 5.

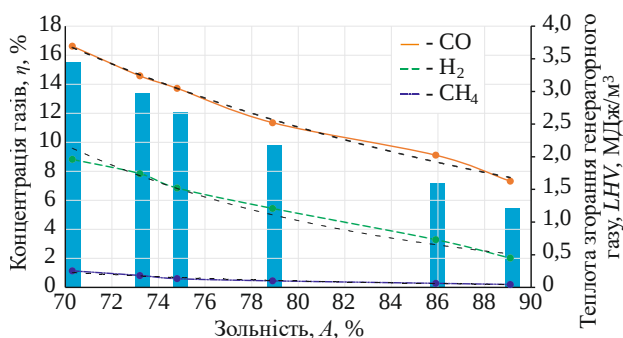


Рис. 5. Результати зміни концентрації горючих газів та теплоти згорання від зольності сировини породного відвалу

Аналіз наведених даних на рис. 5 свідчить, що зі зростанням показників зольності відходів вихід горючих генераторних газів зменшується за експоненціальними залежностями відповідно:

$$-CO \eta_{CO} = \frac{306,4}{\exp(0,04A)}, \%,$$

$$-H_2 \eta_{H_2} = \frac{1959,9}{\exp(0,08A)}, \%,$$

$$-CH_4 \eta_{CH_4} = \frac{471,1}{\exp(0,08A)}, \%,$$

Зміна концентрації горючих газів зумовлена підвищенням частки інертного мінерального складника та відповідним зниженням реакційної здатності сировини в умовах газифікації. Зокрема, в діапазоні зольності 70,3–89,1 % мінімальні значення виходу генераторного газу становлять 0,36–0,98 м³, тоді як максимальні – 0,41–1,13 м³. При цьому склад генераторного газу зазнає суттєвих змін залежно від зольності сировини. За високих значень зольності 85,9–89,1 % газ характеризується низьким вмістом горючих компонентів: концентрація CO становить 7,32–9,12 %, H₂ – 2,02–3,29 %, за наявності CH₄ на рівні 0,2–0,28 %. За таких умов теплота згоряння генераторного газу перебуває в межах 1,21–1,61 МДж/м³.

Зі зменшенням зольності до 73,2–74,8 % спостерігається зростання вмісту горючих компонентів: частка CO підвищується до 13,72–14,58 %, H₂ – до 6,85–7,84 %, а вміст CH₄ зростає до 0,6–0,82 %, що позитивно позначається на теплотворній здатності газу, яка збільшується до 2,69–2,98 МДж/м³.

Подальше зниження зольності до 70,3 % забезпечує формування генераторного газу з максимальним вмістом горючих компонентів: CO – 16,62 %, H₂ – 8,82 %, CH₄ – 1,14 %. За таких умов теплота згоряння газу досягає 3,46 МДж/м³, що свідчить про істотне підвищення енергетичної цінності генераторного газу.

Необхідно відмітити, що зі зменшенням зольності активізуються гетерогенні реакції газифікації вуглецю, зокрема реакції Будуара (C + CO₂ → 2CO) та водяного газу (C + H₂O → CO + H₂), а також зростає роль вторинних перетворень, включно з конверсією оксиду вуглецю з водяною парою (CO + H₂O → CO₂ + H₂). Інтенсифікація цих реакцій забезпечує підвищення концентрації CO та H₂ у складі генераторного газу і зниження частки CO₂, що зумовлює зростання його теплотворної здатності з 1,21 МДж/м³ до 3,46 МДж/м³, що підтверджує доцільність зменшення зольності відходів як одного з ключових чинників інтенсифікації процесу газифікації та підвищення його енергетичної ефективності.

Висновки. Проведений аналіз свідчить про високу перспективність газифікації відходів гірничого виробництва як елемента ресурсоефективної та циркулярної моделі розвитку, оскільки значні обсяги техногенних масивів формують не лише екологічні ризики, а й суттєвий вторинний енергетичний потенціал. Газифікація відходів вуглевидобутку дає змогу ефективно залучати матеріали з високою зольністю та складним органомінеральним складом, що є її ключовою перевагою порівняно з прямим спалюванням,

а утворення генераторного газу, збагаченого CO та H₂, забезпечує можливість його використання як універсального енергоносія та хімічної сировини.

У результаті проведених досліджень установлено, що відходи вуглевидобутку, складовані у відвалах шахти «Великомостівська», характеризуються високими значеннями зольності, які перебувають у межах 70,3–89,1 %, що свідчить про переважання мінерального складника та обмежений, але технологічно значущий уміст вуглецевмісної фракції.

За результатами досліджень установлено, що вміст горючих компонентів генераторного газу CO, H₂ та CH₄ змінюється за експоненційними

залежностями від зольності вуглецевмісної сировини. Зі зростанням зольності їх концентрації зменшуються внаслідок скорочення частки реакційно-активного вуглецю та збільшення інертного мінерального баласту. Виявлені залежності відображають згасання термохімічних реакцій газифікації та можуть бути використані для прогнозування складу й теплотворної здатності генераторного газу.

Вдячність. Представлені результати отримано в межах виконання науково-дослідної роботи ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля» (проект №0123U101757) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. International Energy Agency. Global coal consumption, 2000–2026. 2025. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-coal-consumption-2000-2026>
2. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris : IEA. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
3. Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD Economic Outlook 2022. Paris: OECD Publishing. 2022. URL: <https://www.oecd.org/economic-outlook/>
4. Bórawski P., Beldycka-Bórawska A., Holden L. Changes in the Polish coal sector economic situation with the background of the European Union energy security and eco-efficiency policy. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 726. <https://doi.org/10.3390/en16020726>
5. European Commission. Coal regions in transition. 2020. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/clean-energy-transition/eu-coal-regions-transition_en
6. Uyanik S., Dogerlioglu Isiksungur O. How realistic are coal phase-out timeline targets for Turkey? *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 4. 1649. <https://doi.org/10.3390/su16041649>
7. Araujo F. S. M. et al. Recycling and reuse of mine tailings: A review. *Geosciences*. 2022. Vol. 12, No. 9. 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
8. Janáková I. Utilisation of mining waste. *Sustainability and Mining Waste Journal*. 2025. Vol. 1, No. 1. P. 35. <https://doi.org/10.3390/2673-4591/116/1/35>
9. Petlovanyi M.V., Medianyuk V.Y. Assessment of coal mine waste dumps development priority. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. No. 4. P. 28–35. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/3>
10. Kostenko V., Bohomaz O., Hlushko I., Liashok N., Kostenko T. Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17, No. 4. P. 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>
11. Zubov A., Zubov A., Zubova L. Ecological hazard, typology, morphometry and quantity of waste dumps of coal mines in Ukraine. *Ecological Questions*. 2023. Vol. 34, No. 4. P. 1–19. <https://doi.org/10.12775/EQ.2023.042>
12. Nádudvari Á. et al. Organic minerals in a self-heating coal-waste dump in Upper Silesia, Poland: Structure, formation pathways and environmental issues. *International Journal of Coal Geology*. 2024. Vol. 281. 104403. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104403>
13. Чоботько І. Обґрунтування способів та методів усунення самозаймання відходів гірничого виробництва. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2022. № 1(50). С. 166–171. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2022-1-166-171>
14. Jiao Y. et al. A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 170. P. 1240–1260. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083>
15. Wang G., Ma L., Liu Y. Characteristics and health impacts of dust pollution in open-pit coal mining areas. *Atmosphere*. 2024. Vol. 15, No 12. 1408. <https://doi.org/10.3390/atmos15121408>
16. Szymankiewicz K. et al. Parameterization of dust emissions from heaps and excavations based on measurement results and mathematical modelling. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 13. 2447. <https://doi.org/10.3390/rs16132447>

17. Makwana J. et al. An analysis of waste/biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: A review. *International Journal of Thermofluids*. 2023. Vol. 20. 100492. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100492>
18. Li G. A review of recent advances in biomass-derived porous carbon materials for clean energy and environmental applications. *Porous Materials*. 2025. Vol. 11, No. 4. P. 92. <https://www.mdpi.com/2311-5629/11/4/92>
19. Devi R. et al. Recent advancement in biomass-derived activated carbon for wastewater treatment, energy storage, and gas purification: A review. *Journal of Materials Science*. 2023. Vol. 58, No. 30. P. 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08773-0>
20. Antony Jose S. et al. Promoting a circular economy in mining practices. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 24. 11016. <https://doi.org/10.3390/su162411016>
21. European Commission. A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. 2020. URL: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en
22. Geng Y., Fu J., Sarkis J., Xue B. Towards a national circular economy indicator system in China. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 23, No. 1. P. 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>
23. Li J. et al. Thermochemical conversion of solid waste and coal blends for syngas production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 136. 110412. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110412>
24. Jha S. et al. A review of thermochemical conversion of waste biomass to biofuels. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 17. 6352. <https://doi.org/10.3390/en15176352>
25. Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: A review of prediction methods. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019. Vol. 6, No. 2. P. 151–168. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-0242-9>
26. Nguyen P. M. V. A review of the impact of spontaneous combustion on slope stability in coal mine waste dumps. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 13. 7138. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7138>
27. Izak P. et al. Utilisation of mining waste for production of ceramic tiles *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 7. 3957. <https://doi.org/10.3390/app15073957>
28. Miao H. et al. Effects of Na₂CO₃/Na₂SO₄ on catalytic gasification reactivity and mineral structure of coal gangue. *Energy*. 2022. Vol. 255. 124498. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124498>
29. Lysyi N. et al. Thermodynamic research of coal mining waste gasification processes. *Mining of Mineral Deposits*. 2025. Vol. 19, No. 3. P. 132–143. <https://doi.org/10.33271/mining19.03.132>
30. Dychkovskiy R. et al. Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
31. Wang B. et al. Study on co-pyrolysis of coal and biomass and process simulation optimization. 2023. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1939.v1>
32. Ungureanu N. Municipal solid waste gasification: Technologies, process readiness and integration within circular economy frameworks. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 15. 6704. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/15/6704>
33. Ban Y. et al. The catalytic effect of calcium and potassium on CO₂ gasification of Shengli lignite. *Royal Society Open Science*. 2018. Vol. 5, No. 9. 180717. <https://doi.org/10.1098/rsos.180717>
34. Proto A. R. et al. Energetic characteristics of syngas obtained from gasification of hazelnut prunings. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 223. P. 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.288>

REFERENCES:

1. International Energy Agency. (2025). Global coal consumption, 2000-2026. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-coal-consumption-2000-2026>
2. International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
3. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). OECD economic outlook 2022. OECD Publishing. Retrieved from <https://www.oecd.org/economic-outlook/>
4. Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., & Holden, L. (2023). Changes in the Polish Coal Sector Economic Situation with the Background of the European Union Energy Security and Eco-Efficiency Policy. *Energies*, 16(2), 726. <https://doi.org/10.3390/en16020726>
5. European Commission. (2020). Coal regions in transition. European Commission. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/topics/clean-energy-transition/eu-coal-regions-transition_en

6. Uyanik, S., & Dogerlioglu Isiksungur, O. (2024). How Realistic Are Coal Phase-Out Timeline Targets for Turkey? *Sustainability*, 16(4), 1649. <https://doi.org/10.3390/su16041649>
7. Araujo, F. S. M., et al. (2022). Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
8. Janáková, I. (2025). Utilisation of Mining Waste. *Sustainability and Mining Waste Journal*, 1(1), 35. <https://doi.org/10.3390/2673-4591/116/1/35>
9. Petlovanyi, M. V., & Mediany, V. Y. (2018). Assessment of coal mine waste dumps development priority. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/3>
10. Kostenko, V., Bohomaz, O., Hlushko, I., Liashok, N., & Kostenko, T. (2023). Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>
11. Zubov, A., Zubov, A., & Zubova, L. (2023). Ecological hazard, typology, morphometry and quantity of waste dumps of coal mines in Ukraine. *Ecological Questions*, 34(4). <https://doi.org/10.12775/EQ.2023.042>
12. Nádudvari, Á., Krzykowski, T., Jabłońska, M., Fabiańska, M., Skrzyńska, K., Abramowicz, A., Książek, M., & Ciesielczuk, J. (2024). Organic minerals in a self-heating coal-waste dump in Upper Silesia, Poland: Structure, formation pathways and environmental issues. *International Journal of Coal Geology*, 281, 104403. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104403>
13. Chobotko, I. (2022). Obgruntuvannia sposobiv ta metodiv usunennia samozaimannia vidkhodiv hirnychoho vyrobnytstva [Justification of methods and techniques for the elimination of self-disposal of mining waste]. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 1, 166 – 171. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2022-1-166-171> [in Ukrainian]
14. Jiao, Y., Zhang, C., Su, P., Tang, Y., Huang, Z., & Ma, T. (2023). A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, 1240–1260. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083>
15. G. Wang, L. Ma, Y. Liu (2024). Characteristics and health impacts of dust pollution in open-pit coal mining areas. *Atmosphere*, 15(12), 1408. <https://doi.org/10.3390/atmos15121408>
16. Szymankiewicz, K., Posyniak, M., Markuszewski, P., & Durka, P. (2024). Parameterization of Dust Emissions from Heaps and Excavations Based on Measurement Results and Mathematical Modelling. *Remote Sensing*, 16(13), 2447. <https://doi.org/10.3390/rs16132447>
17. Makwana, J., Dhass, A. D., Ramana, P. V., Sapariya, D., & Patel, D. (2023). An analysis of waste/ biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: A review. *International Journal of Thermofluids*, 20, 100492. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100492>
18. Li, G. (2025). A Review of Recent Advances in Biomass-Derived Porous Carbon Materials for Clean Energy and Environmental Applications. *Porous Materials*, 11(4), 92. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2311-5629/11/4/92>
19. Devi, R., Kumar, V., Kumar, S., & Bulla, M. (2023). Recent advancement in biomass-derived activated carbon for wastewater treatment, energy storage, and gas purification: A review. *Journal of Materials Science*, 58(30), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08773-0>
20. Antony Jose, S., Calhoun, J., Renteria, O. B., Mercado, P., Nakajima, S., Hope, C. N., Sotelo, M., & Menezes, P. L. (2024). Promoting a Circular Economy in Mining Practices. *Sustainability*, 16(24), 11016. <https://doi.org/10.3390/su162411016>
21. European Commission. (2020). A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. *Publications Office of the European Union*. Retrieved from https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en
22. Geng, Y., Fu, J., Sarkis, J., & Xue, B. (2012). Towards a national circular economy indicator system in China: An evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 216 – 224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>
23. Li, J., Zhang, X., Yang, W., Blasiak, W., & Wang, X. (2021). Thermochemical conversion of solid waste and coal blends for syngas production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110412. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110412>
24. Jha, S., Nanda, S., Acharya, B., & Dalai, A. K. (2022). A Review of Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Biofuels. *Energies*, 15(17), 6352. <https://doi.org/10.3390/en15176352>
25. Onifade, M., & Genc, B. (2019). Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: a review of prediction methods. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(2), 151–168. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-0242-9>

26. Nguyen, P. M. V. (2025). A review of the impact of spontaneous combustion on slope stability in coal mine waste dumps. *Applied Sciences*, 15(13), 7138. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7138>
27. Izak, P., Delihowski, J., Mastalska-Popławska, J., & Stempkowska, A. (2025). Utilisation of Mining Waste for Production of Ceramic Tiles. *Applied Sciences*, 15(7), 3957. <https://doi.org/10.3390/app15073957>
28. Miao, H., Wang, Z., Wang, Z., Sun, H., Li, X., Liu, Z., Dong, L., Zhao, J., Huang, J., & Fang, Y. (2022). Effects of $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{SO}_4$ on catalytic gasification reactivity and mineral structure of coal gangue. *Energy*, 255, 124498. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124498>
29. Lysyi, N., Helesh, A., Popovych, V., Saik, P., & Dmytruk, O. (2025). Thermodynamic research of coal mining waste gasification processes. *Mining of Mineral Deposits*, 19(3), 132–143. <https://doi.org/10.33271/mining19.03.132>
30. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Sala, D., Hankus, Ł., Magdziarczyk, M., & Smoliński, A. (2025). Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
31. Wang, B., Liu, N., Wang, S., Li, X., Li, R., & Wu, Y. (2023). Study on Co-pyrolysis of Coal and Biomass and Process Simulation Optimization. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1939.v1>
32. Ungureanu, N. (2025). Municipal solid waste gasification: Technologies, process readiness and integration within circular economy frameworks. *Sustainability*, 17(15), 6704. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/15/6704>
33. Ban, Y., Wang, Y., Li, N., He, R., Zhi, K., & Liu, Q. (2018). The catalytic effect of calcium and potassium on CO_2 gasification of Shengli lignite: the role of carboxyl. *Royal Society Open Science*, 5(9), 180717. <https://doi.org/10.1098/rsos.180717>
34. Proto, A. R., Longo, L., Gambella, F., Zimbalatti, G., Macrì, G., Gallucci, F., Caruso, L., Salerno, M., & Colantoni, A. (2016). Energetic Characteristics of Syngas Obtained from Gasification of Hazelnut Prunings. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, (223), 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.288>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 29.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026