

© П.Б. Саїк¹, О.О. Дмитрук¹, Н.Р. Лисий²

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро Україна

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

ДО ПИТАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВМІСНИХ ВІДХОДІВ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

P. Saik¹, <https://orcid.org/0000-0001-7758-1083>

O. Dmytruk¹, <https://orcid.org/0000-0001-6311-6252>

N. Lysyi² <https://orcid.org/0009-0006-7050-0395>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²Lviv State University of Life Safety Educational and Research, Lviv, Ukraine

ON THE ISSUE OF UTILIZATION OF CARBON-CONTAINING MINING WASTE

Мета роботи полягає у систематизації фізико-хімічних реакцій газифікації вуглецевмісної сировини, розробленні рівнянь для оцінки ефективності процесу та визначенні взаємозв'язків між його основними енергетичними й технологічними параметрами.

Методика досліджень ґрунтувалася на вивченні фізико-хімічних реакцій газифікації вуглецевмісної сировини шляхом аналізу, узагальнення й систематизації наукових даних щодо механізмів їх протікання на стадіях сушіння, піролізу, окиснення та відновлення. Для оцінювання ефективності процесу було здійснено побудову залежностей основних показників у відносних одиницях (0 – 1) від ступеня перетворення вуглецю у горючі генераторні гази. Відносні значення параметрів отримували шляхом приведення експериментальних та розрахункових даних до єдиного безрозмірного масштабу, що забезпечує узагальнення результатів, порівняння енергетичних та технологічних характеристик процесу із встановленням залежностей їх взаємозв'язку.

Результати дослідження. Сформовано методологічні засади оцінювання ефективності процесу газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва. Встановлено взаємозв'язки між енергетичними та технологічними параметрами процесу газифікації. Отримані результати відображають залежності переходу процесу газифікації вуглецевмісної сировини до енергоефективного режиму, що створює підґрунтя для подальшої оптимізації його технологічних умов і підвищення загальної ефективності процесу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку теоретичних засад енергетичного аналізу процесів газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва на основі вперше запропоновано підходу до представлення параметрів процесу газифікації у відносних одиницях, що забезпечує можливість їх порівняння.

Практичне значення. Розроблено методику оцінювання ефективності процесу газифікації на основі аналізу взаємозв'язків між основними енергетичними та технологічними параметрами, що дає змогу визначати оптимальні режими роботи системи, підвищувати її енергоефективність і обґрунтовувати технологічні рішення для практичного впровадження процесів термохімічної переробки вуглецевмісних відходів.

Ключові слова: підземна газифікація, вуглецевмісна сировина, відходи гірничого виробництва, генераторний, ефективність.

Вступ. У сучасних умовах енергетичної трансформації, коли відбувається поступовий перехід від традиційних викопних джерел енергії до відновлюваних та низьковуглецевих, особливого значення набуває повторне використання вуглецевмісних ресурсів, які залишаються у гірничих регіонах [1–3]. Значна частина запасів вугілля залишається невідпрацьованою в межах шахтних полів через технологічні або економічні обмеження. Крім того, на поверхні нагромаджені мільйони тон відходів збагачення, шламів і порід, які мають високий вміст органічного вуглецю, що становить потенційну енергетичну цінність [4, 5].

Традиційні способи поводження з такими відходами, а саме складування або спалювання, призводять до значного утворення викидів CO_2 , метану й токсичних компонентів, що збільшує екологічне навантаження [6, 7]. Натомість сучасна концепція циркулярної економіки передбачає замкнений цикл використання ресурсів, у якому відходи одного процесу стають сировиною для іншого. У цьому контексті технології термохімічної деструкції вугілля та відходів гірничого виробництва є одним із ключових напрямів перетворення твердих вуглецевмісних залишків у цінні енергетичні продукти такі як генераторний газ, водень, синтез-газ та тепло [8-10].

Технологія термохімічної деструкції охоплює низку взаємопов'язаних процесів до яких відносять піроліз, часткове окиснення, парову конверсію, відновлення оксидів вуглецю, що в сукупності забезпечують глибоке перетворення вуглецю, який міститься у паливі [11, 12]. Її застосування в умовах підземного або напівзамкненого середовища дозволяє не лише утилізувати шахтні відходи, а й створити енергетичні системи, де теплова енергія, газоподібні продукти та залишкове тепло використовуються повторно [13].

Тому актуальним завданням є розробка аналітичних моделей, які дозволить кількісно описати закономірності процесів термохімічної деструкції вуглецевмісної сировини та встановити взаємозв'язки між технологічними параметрами (температурою, тиском, складом дуття, вологістю, часом реакції) та енергетичними характеристиками утвореного газу.

Мета роботи полягає у систематизації фізико-хімічних реакцій, що відбуваються під час газифікації вуглецевмісної сировини, а також розробленні рівнянь для визначення показників ефективності процесу газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва та встановлення взаємозв'язків між основними енергетичними й технологічними параметрами процесу.

Вирішення поставленої мети передбачало розв'язання наступних завдань:

1. Визначити основні фізико-хімічні реакції, що формують склад генераторного газу під час термохімічної деструкції вуглецевмісних відходів гірничого виробництва.
2. Сформулювати рівняння тепломасообміну при газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва та показників ефективного ведення процесу газифікації.

Методика проведення досліджень направлена на вивчення фізико-хімічних реакцій газифікації вуглецевмісної сировини та ґрунтується на аналізі, узагальненні й систематизації наукових напрацювань щодо механізмів протікання

реакцій на різних стадіях процесу. Вона передбачає класифікацію основних реакцій газифікації відповідно до їхніх стадій, а саме: сушіння, піролізу, окиснення та відновлення

Для оцінки ефективності процесу газифікації проведено побудову графічних залежностей зміни основних показників у відносних одиницях, що дало змогу узагальнити результати аналізу та визначити характер взаємозв'язків між параметрами процесу. На початковому етапі визначення відносних одиниць показників ефективності процесу газифікації проводимо впорядкування основних параметрів (ступінь перетворення вуглецю у відходах у горючі генераторні газу (k_c), вихід горючих газів (об'ємний або масовий на одиницю вихідної сировини) ($V_{г.г.}$), теплоту згоряння отриманого газу ($Q_{г.г.}$), коефіцієнт корисної дії процесу газифікації (η), питому витрату тепла на одиницю виробленого генераторного газу (q) відносно одного узагальнюючого показника, яким у даному випадку обрано ступінь перетворення вуглецю у відходах у горючі генераторні газу (k_c). Такий підхід забезпечує можливість побудови взаємопов'язаних графічних залежностей, що відображають динаміку зміни показників процесу в межах одного узгодженого параметра (k_c) у відносних одиницях від 0 до 1, де значення 1 відповідає повному перетворенню вуглецю у горючі компоненти генераторного газу (вісь x). Отже, на осі у відображено інші показники ефективності процесу газифікації. Згідно з проведеними дослідженнями [14], під час газифікації вугілля при повітряному дутті середній вихід горючих генераторних газів становить близько 1,39 м³/кг, за теплоти згоряння 5,91 МДж/м³.

Оскільки вміст вуглецю у відходах може змінюватися у широких межах залежно від складу сировини, для розрахунків прийнято теплоту згорання вугілля, що відповідає умовам газифікації вугілля марки Г – близько 30,1 МДж/кг (ділянка «Соленівська» Донецького кам'яновугільного басейну, пласт c_6). Це значення використовується як еталонне для оцінювання енергетичної ефективності газифікації вуглецевмісних відходів різного складу та походження.

Відповідно до зазначених даних, при коефіцієнті корисної дії процесу газифікації 52 – 73 %, розрахована питома витрата теплової енергії на утворення 1 м³ генераторного газу становить близько 11,25 МДж/м³.

Отже, під час побудови графічних залежностей у відносних одиницях діапазон зміни параметрів по осі у приймається в межах 0 → 1, де 1 відповідає максимальному значенню енергетичних характеристик процесу, 0 мінімальному рівню енергоефективності, що відповідає нижній межі експериментальних даних. У загальному формулу для визначення відносних значень можна написати у вигляді:

$$y_{відн.} = \frac{y_i - y_{min.}}{y_{max.} - y_{min.}},$$

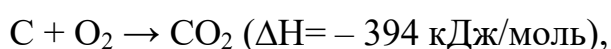
де y_i – поточне значення параметра, м³/кг, МДж/м³, %, МДж/м³; $y_{min.}$, $y_{max.}$ – відповідно мінімальне та максимальне значення параметра в досліджуваному діапазоні, м³/кг, МДж/м³, %, МДж/м³.

Таким чином, представлення результатів дослідження у відносних одиницях забезпечує узгодження різних енергетичних характеристик процесу газифікації, що дозволяє побудувати інтегральну оцінку ефективності та виявити оптимальні зони роботи підземного газогенератора в межах встановленого діапазону енергетичних параметрів.

Основна частина. Процес газифікації вугілля та вуглецевмісних відходів гірничого виробництва є складною сукупністю взаємопов'язаних фізико-хімічних, теплових і масообмінних процесів, які відбуваються у підземному газогенераторі за умов обмеженого доступу кисню [15, 16].

На початковому етапі газифікації важливу роль відіграють фізичні процеси дегідратації та піролізу. У діапазоні температур 100 – 250 °С відбувається видалення фізично зв'язаної вологи, що знижує теплове навантаження на наступні етапи. При подальшому нагріванні (350 – 600 °С) починаються піролізні реакції, тобто термічний розклад органічної речовини вугілля без доступу кисню. У цей період утворюються леткі компоненти (CO, CH₄, H₂, CO₂, H₂O та ін.) та твердий залишок, який є основною реакційною фазою на наступних стадіях. Необхідно відмітити, що продукти піролізу залежать від ступеня метаморфізму вугілля та його наявності в відходах гірничого виробництва. Наприклад, буре вугілля під час піролізу утворює значну кількість летких сполук, тоді як антрацит характеризується переважним утворенням твердого вуглецевого залишку.

Після завершення піролізу процес термохімічної деструкції переходить у стадію активної газифікації. У цій зоні (> 860 °С) відбувається інтенсивна взаємодія вуглецю з компонентами дуття, що у своєму складі можуть містити кисень, водяну пару чи вуглекислий газ [17]. Стадія активної газифікації супроводжується екзотермічними та ендотермічними реакціями, які формують склад генераторного газу та визначають його теплоту згоряння [18, 19]. Початковим етапом газифікації є реакція повного окиснення:

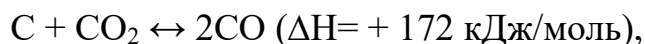


яка є екзотермічною і забезпечує необхідну кількість тепла для підтримання високої температури в реакційній зоні. Цей процес відбувається у площині контакту дуттьової суміші з вуглецевмісною сировиною, де концентрація кисню найбільша. Одночасно з реакцією повного окиснення відбувається реакція неповного окиснення (газифікації), у результаті якої утворюється оксид вуглецю (CO) та виділяється менша кількість теплоти:

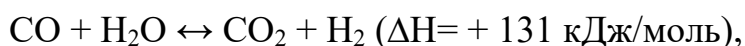


що також виділяє тепло, але утворює горючий оксид вуглецю. Частка цієї реакції зростає, коли зменшується кількість доступного кисню. Саме вона визначає формування CO, який разом з H₂ є головним енергетичним компонентом генераторного газу. За межами площини контакту дуттьової суміші з сировиною, що газифікується вуглець вступає у взаємодію з продуктами первинного згоряння, а саме CO₂, H₂O та H₂. Ці реакції є ендотермічними, тобто відбувається поглинання

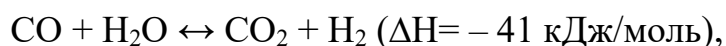
тепла, що утворилося при екзотермічних реакціях. Взаємодія вуглецю з діоксидом вуглецю (реакція Будуара):



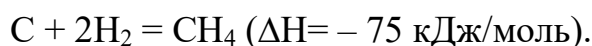
яка забезпечує утворення оксиду вуглецю за рахунок відновлення CO_2 при температурах вище 900°C . Це одна з ключових реакцій, що впливає на теплоту згорання генераторного газу. При тому ключовим джерелом утворення водню і оксиду вуглецю є реакція



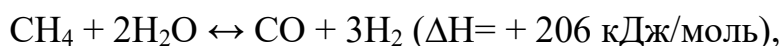
є ендотермічною, а її швидкість істотно залежить від температури та вологості як вугілля так і відходів гірничого виробництва. Необхідно відмітити, що ефективність процесу підвищується за температурного режиму понад 950°C і за наявності достатньої кількості водяної пари у реакційній зоні. При тому співвідношення між H_2 та CO описується реакцією:



яка встановлює рівновагу між компонентами газової суміші та формує її окисно-відновний потенціал. Аналіз даної реакції вказує, що зі зростанням температури рівновага реакції зміщується вліво, що призводить до зменшення частки водню в газовій суміші, тоді як за зниження температури процес переважає у зворотному напрямку, тобто, забезпечуючи інтенсивніше утворення H_2 . Щодо утворення газу метану (CH_4), який є горючим компонентом генераторного газу, то він утворюється внаслідок реакції метанування:



Ця реакція є екзотермічною та протікає при нижчих температурах ($700 - 900^\circ\text{C}$) та підвищеному тиску. Водночас при високих температурах ($>1000^\circ\text{C}$) відбувається зворотний процес – паровий риформінг метану:



який є ендотермічним і супроводжується значним поглинанням тепла, що сприяє інтенсивному утворенню водню. Співвідношення між реакціями метанування та парового риформінгу визначає не лише кількісний вміст H_2 у генераторному газі, а й його загальну теплоту згорання. Встановлено, що оптимальний склад генераторного газу для енергетичних цілей формується при температурі $860 - 1100^\circ\text{C}$, коли досягається баланс між виходом водню, оксиду вуглецю та стабільною теплотворною здатністю суміші. При тому диференціальне рівняння теплового балансу при газифікації вугілля матиме вигляд [20, 21]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_p - Q_w,$$

де ρ – щільність вугілля, кг/м^3 ; c_p – питома теплоємність вугілля, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ – градієнт температури, тобто напрямок та швидкість зміни те-

мператури; Q_p – тепло, що виділяється або поглинається внаслідок хімічних реакцій при газифікації вугілля, Дж ; Q_w – теплота випаровування води з вугілля, Дж/кг .

Технологічна схема синтезу газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва передбачає залучення залишкового тепла від зони газифікації вугілля. За рахунок цього відходи подаються в реакційне середовище (вигазований простір) із температурним режимом $100 - 250\text{ }^\circ\text{C}$. За таких умов зменшуються витрати тепла на прогрів та випаровування води, що призводить до прискорення початкових реакцій газифікації. Тому диференціальне рівняння теплового балансу при газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва набуває вигляду:

$$\rho^g c_p^g \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda^g \nabla T) + Q_p^g - Q_w^g + Q_z,$$

де ρ^g – щільність вуглецевмісних відходів, кг/м^3 ; c_p^g – питома теплоємність вугле-

цевмісних відходів, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; $\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ – градієнт температури, на пря-

мок та швидкість зміни температури; Q_p^g – тепло, що виділяється або поглина-

ється внаслідок хімічних реакцій при газифікації відходів, Дж/кг ; Q_w^g – теплота випаровування води з відходів палива, Дж/кг ; Q_z – залишкове тепло після газифікації вугілля, Дж/кг .

Аналіз рівняння теплового балансу показує, що за умов, коли сумарне тепловиділення від хімічних реакцій та додаткових джерел перевищує теплові втрати, енергетичний баланс системи зміщується в бік накопичення. Це сприяє інтенсифікації процесів газифікації та переходу системи у стійкий термохімічний режим. У цьому режимі температура реакційної зони підтримується на рівні, достатньому для перебігу основних ендотермічних реакцій, що забезпечує стабільне утворення горючих газів та підвищення загальної енергоефективності процесу. При тому ефективність процесу газифікації вуглецевмісних відходів визначається комплексом взаємопов'язаних показників, що відображають ступінь перетворення вуглецю у відходах у горючі генераторні гази (k_c); вихід горючих газів (об'ємний або масовий на одиницю вихідної сировини) ($V_{g.e.}$); теплоту згоряння отриманого газу ($Q_{g.e.}$); коефіцієнт корисної дії процесу газифікації (η); питому витрату тепла на одиницю виробленого генераторного газу (q). У сукупності ці показники дозволяють оцінити не лише якість отриманого газу, але й ступінь використання енергетичного потенціалу відходів та визначити оптимальні умови газифікації для досягнення максимальної ефективності ведення процесу.

Ступінь перетворення вуглецю можна охарактеризувати коефіцієнтом (k_c), який визначає частку твердого вуглецю, що перейшов у генераторний газ, і описується рівнянням:

$$k_c = \frac{m_c^0 - m_c^3}{m_c^0},$$

де m_c^0 – початкова маса вуглецю у паливі, кг, m_c^3 – маса незреагованого вуглецю у залишку, кг. Підвищення значень коефіцієнта (k_c) свідчить про більш повне використання частки твердого вуглецю, що переходить у газоподібний стан у процесі газифікації і характеризується інтенсивнішим протіканням хімічних реакцій відновлення та окиснення, а також на ефективний розподіл теплової енергії в реакційній зоні. Таким чином, підвищення (k_c) є показником ефективнішого теплообміну між твердою та газовою фазами, стабільнішої термохімічної рівноваги й загальної енергоефективності процесу газифікації.

Вихід горючого генераторного газу відображає продуктивність процесу газифікації, характеризуючи кількість горючих газоподібних продуктів, отриманих із одиниці маси або об'єму палива під час його перетворення, і описується відповідним рівнянням:

$$V_{г.г.} = \frac{\sum V \cdot \eta_{CH_4} + \sum V \cdot \eta_{CO} + \sum V \cdot \eta_{H_2}}{100m_c^0}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

де m_c^0 – початкова маса вуглецю у паливі, кг; η_{CH_4} , η_{CO} , η_{H_2} – відповідно концентрація метану, чадного газу та водню у генераторному газі, %; $\sum V$ – загальний об'єм генераторного газу, м³.

Основним показником енергетичної цінності генераторного газу є його теплота згорання, розрахунок якої можна провести за формулою «адитивності», відповідно до якої сумарна теплота згорання газу дорівнює сумі теплот згорання окремих горючих газів, зважених за їх об'ємною або молярною часткою у складі газової суміші:

$$Q_{г.г.} = \sum_i V_i Q_i, \text{ МДж/м}^3,$$

де V_i – об'ємна або молярна частка i -го горючого газу; Q_i – теплота згорання i -го горючого газу, МДж/м³.

Коефіцієнт корисної дії газифікації (η) характеризує ефективність перетворення енергії твердого палива в енергію генераторного газу. Він визначається як відношення теплової енергії, що міститься в отриманому газі, до потенційної теплоти згорання вихідного палива, тобто:

$$\eta = \frac{Q_{г.г.} V_{г.г.}}{Q_{в.в.} m_{в.в.}}$$

де $Q_{г.г.}$ – теплота згоряння генераторного газу, МДж/м³; $V_{г.г.}$ – об'єм отриманого генераторного газу, м³; $Q_{в.в.}$ – теплота згоряння вуглецевмісних відходів, МДж/кг; $m_{в.в.}$ – маса вуглецевмісних відходів, кг.

Питома витрата тепла на газифікацію вуглецевмісних відходів відображає кількість теплоти, необхідної для утворення одиниці об'єму генераторного газу, і є показником енергетичної ефективності процесу. Вона характеризує, скільки енергії потрібно підвести до системи для забезпечення перебігу всіх ендотермічних реакцій, сушіння, нагрівання та перетворення твердих компонентів у газоподібні продукти. У загальному вигляді питома витрата теплоти визначається як:

$$q = \frac{Q_{підв.}}{V_{г.г.}}, \text{ МДж/м}^3$$

де $Q_{підв.}$ – кількість підведеної теплоти, МДж; $V_{г.г.}$ – об'єм отриманого генераторного газу, м³.

При тому кількість підведеної теплоти ($Q_{підв.}$) відповідно до диференціального рівняння теплового балансу при газифікації вуглецевмісних відходів включає додатково залишкову теплоту, що передається від процесу газифікації вугілля (Q_3).

Узагальнені значення та взаємозв'язки основних параметрів ефективності процесу газифікації вуглецевмісних відходів наведено у таблиці.

Таблиця
Взаємозв'язки між параметрами ефективності процесу газифікації

Показник	Фізичний зміст	Одиниці виміру	Залежить від:	Впливає на:
k_c	Ступінь перетворення вуглецю у газову фазу	-	Температура процесу; тип дугтьової суміші	$V_{г.г.}; Q_{г.г.}; \eta$
$V_{г.г.}$	Вихід горючих газів	м ³	k_c , склад відходів	$Q_{г.г.}; \eta$
$Q_{г.г.}$	Теплота згоряння генераторного газу	МДж/м ³	Склад газу (CO, H ₂ , CH ₄)	η
η	ККД	%	$V_{г.г.}; Q_{г.г.}; \eta; q$	Інтегральна оцінка ефективності
q	Питома витрата теплоти	МДж/м ³	$Q_{підв.}, V_{г.г.}, Q_3$	η (обернено пропорційним)

Відповідно до наведеної інформації (див. табл.), прослідковується чіткий взаємозв'язок між основними параметрами процесу газифікації, які утворюють єдину систему енергетичних залежностей. Так, ступінь перетворення вуглецю (k_c) є початковим параметром, що характеризує рівень використання вуглецевого потенціалу відходів та прямопропорційно визначає вихід горючих газів ($V_{г.г.}$). При підвищенні k_c більша частка вуглецю переходить у газову фазу, зростає об'єм генераторного газу, а також концентрація оксиду вуглецю, водню й метану. Це, у свою чергу, призводить до збільшення теплоти згоряння ($Q_{г.г.}$), оскільки зростає частка високоенергетичних сполук у складі газу.

Показники ($V_{г.г.}$) та ($Q_{г.г.}$) визначають коефіцієнт корисної дії (η), який відображає співвідношення між отриманою енергією у вигляді генераторного газу та потенційною теплотою вихідного палива. При тому тут така зміна характеризується прямою залежністю.

Водночас питома витрата теплоти (q) є параметром, що діє у протилежному напрямку. Зростання q означає більшу кількість енергії, яку потрібно підвести для підтримання реакцій, тобто ефективність зменшується. Саме тому у табл. зазначено, що η є обернено пропорційним до q .

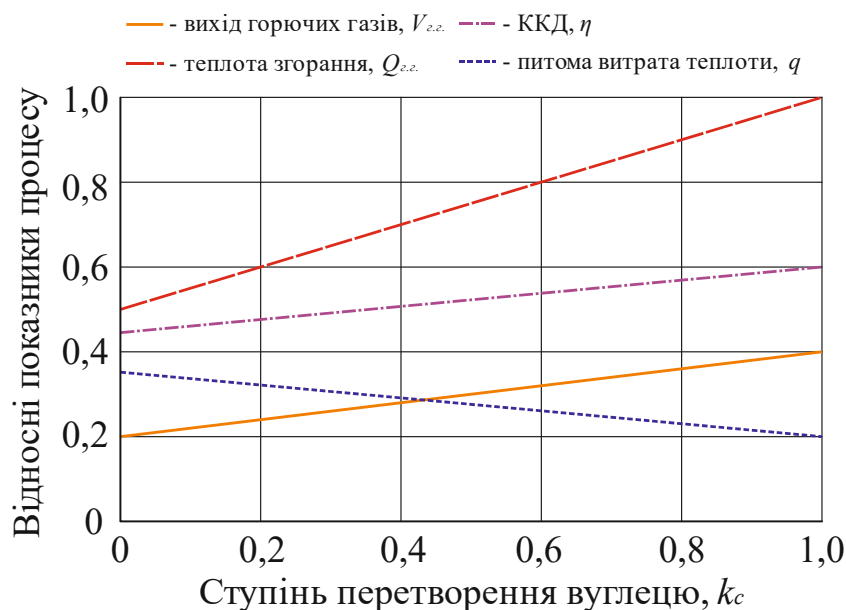


Рис. Залежності зміни показників процесу газифікації від ступеня перетворення вуглецю

Таким чином, відповідно до вищезазначеного можна сформувати ланцюгову залежність процесу газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва: параметри технологічного режиму (температура, склад дуття, тип відходів) $\rightarrow$ ступінь перетворення вуглецю (k_c) $\rightarrow$ вихід горючих газів ($V_{г.г.}$) $\rightarrow$ теплота згоряння ($Q_{г.г.}$) $\rightarrow$ ККД (η) $\leftrightarrow$ питома витрата теплоти (q). У подальшому, з метою забезпечення коректного порівняння основних показників процесу газифікації (див. табл. 1), побудовано графічні залежності у відносних одиницях, що дозволяє узагальнити результати аналізу та відобразити взаємозв'язки між параметрами незалежно від їхніх фізичних одиниць виміру (див. рис.).

Аналіз наведених даних на рис. відображає сукупність залежностей між основними енергетичними параметрами процесу газифікації вуглецевмісних відходів, а саме виходом горючих газів ($V_{g,z}$), теплотою згоряння газу ($Q_{g,z}$), питомими витратами теплоти (q) та енергетичним коефіцієнтом корисної дії (η). Перетини між цими кривими відображають енергетичні показники процесу газифікації при різних ступенях перетворення вуглецю (k_c).

Перетин $V_{g,z}$ та q вказує на фазу, коли кількість утвореного газу стає пропорційною до питомих енерговитрат. Це свідчить про баланс між інтенсивністю газоутворення та енергоспоживанням. За таких умов процес газифікації потребує додаткового тепла для ендотермічних реакцій, після чого система починає ставати автономною за рахунок виділення тепла екзотермічних реакцій окиснення.

Можливий перетин $Q_{g,z}$ та q свідчить про досягнення енергетичної рівноваги між витратою тепла і тепловою цінністю продуктів газифікації. Цей етап характеризує найбільш стабільний тепловий режим, за якого відсутні надлишкові втрати енергії. Він визначає технологічно доцільну температуру зони реакції. При тому взаємодія $Q_{g,z}$ та η має вирішальне значення для оцінювання енергетичної ефективності процесу. Це означає, що система переходить у фазу оптимального енергетичного використання, коли додаткова енергія реакцій спрямовується на формування цільових компонентів генераторного газу (H_2 , CO , CH_4), а не на нагрів середовища. Водночас можливий збіг залежностей η та $V_{g,z}$ свідчить про етап, коли ефективність використання енергії системою стає пропорційною виходу газоподібних продуктів. За таких умов процес поступово переходить у зону насичення, де подальше зростання об'єму газу вже не супроводжується суттєвим його підвищенням.

Відсутність точок збігу між окремими залежностями, зокрема між q та η , пояснюється тим, що питомі енерговитрати зменшуються рівномірно, тоді як коефіцієнт корисної дії має сталу тенденцію до зростання. Це відображає енергетичну асиметрію системи, де підвищення ефективності досягається не за рахунок зниження теплового потенціалу, а через його раціональніше використання.

Таким чином, аналіз взаємних перетинів показує, що процес газифікації відбувається поетапно, а саме від теплової активації до досягнення максимальної ефективності. Взаємне положення залежностей дозволяє визначити оптимальні режими подачі дуття, температури та тривалості процесу, що забезпечують найкраще співвідношення між виходом продуктів і витратами енергії.

Висновки. Газифікація відходів гірничого виробництва відкриває перспективи комплексного використання вуглецевмісної сировини, що нині розглядається як техногенна сировина. Реалізація процесу дозволить зменшити обсяги промислових відходів, знизити викиди парникових газів, отримати додаткові енергетичні ресурси у вигляді генераторного газу. Отже, технологія газифікації відходів гірничого виробництва сприяє трансформації галузі у напрямі реалізації принципів циркулярної економіки та забезпечує передумови для сталого розвитку гірничодобувної промисловості.

Розроблена методологія оцінювання ефективності процесу газифікації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва забезпечує можливість комплексного аналізу взаємозв'язків між енергетичними та технологічними показниками та дозволяє їх узагальнювати в єдиній системі відносних параметрів з визначенням залежностей переходу процесу на енергоефективний режим.

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

Перелік посилань

1. Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., & Dincer, I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(50), 25385–25412. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>
2. Saik, P., Lozynskyi, V., Yankin, D., Lysy, N., & Cherniaiev, O. (2025). Substantiation into the efficiency of the coal gasification process with a focus on hydrogen production. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 85–92. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-3/085>
3. Dai, F., Zhang, S., Luo, Y., Wang, K., Liu, Y., & Ji, X. (2023). Recent Progress on Hydrogen-Rich Syngas Production from Coal Gasification. *Processes*, 11(6), 1765. <https://doi.org/10.3390/pr11061765>
4. Guo, D., Hou, H., Long, J., Guo, X., & Xu, H. (2022). Underestimated environmental benefits of tailings resource utilization: Evidence from a life cycle perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106832. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106832>
5. Петльований, М.В., & Гайдай, О.А. (2017). Аналіз накопичення і систематизація породних відвалів вугільних шахт, перспективи їх розробки. *Геотехнічна механіка*, 136, 147–158.
6. Joseph, R. (2025). Environmental issues in Mining: A Comprehensive Review of Challenges and Strategies for Mitigation and Rehabilitation. *Mining Revue*, 31(3), 51–71. <https://doi.org/10.2478/minrv-2025-0029>
7. Novitskyi, R., Masiuk, O., Napich, H., Pavlychenko, A., & Kovalenko, V. (2023). Assessment of coal mining impact on the geoecological transformation of the Emerald network ecosystem. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 107–112. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/107>
8. Dai, F., Zhang, S., Luo, Y., Wang, K., Liu, Y., & Ji, X. (2023). Recent Progress on Hydrogen-Rich Syngas Production from Coal Gasification. *Processes*, 11(6), 1765. <https://doi.org/10.3390/pr11061765>
9. Saik, P., & Yankin, D. (2025). On the issue of the rational planning of mining operations for underground coal gasification. Collection of Research Papers of the National Mining University, 80, 81–92. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.081>
10. Falshtynskyi, V., Dychkovskyi, R., Saik, P., Lozynskyi, V., Sulaiev, V., & Cabana, E. C. (2019). The Concept of Mining Enterprises Progress on the Basis of Underground Coal Gasification Method Characteristic. *Solid State Phenomena*, 291, 137–147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.291.137>
11. Laciak, M., Kačur, J., & Durdán, M. (2022). Modeling and Control of Energy Conversion during Underground Coal Gasification Process. *Energies*, 15(7), 2494. <https://doi.org/10.3390/en15072494>
12. Ofoe, J. T., Yusuf, M., & Ibrahim, H. (2025). A review on coal pyrolysis and gasification: understanding the chemistries and influence of operating conditions. *Clean Energy*, 9(5), 3–21. <https://doi.org/10.1093/ce/zkaf021>
13. Burchart-Korol, D., Korol, J., & Czaplicka-Kolarz, K. (2016). Life cycle assessment of heat production from underground coal gasification. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(10), 1391–1403. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1102-0>

14. Саїк, П.Б. (2025). *Наукові основи підземної газифікації вугілля з утилізацією вуглекислого газу. Дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук. Спец. 05.15.02 – Підземна розробка родовищ корисних копалин.* Дніпро: НТУ «ДП».
15. Laouafa, F., Farret, R., Vidal-Gilbert, S., & Kazmierczak, J.-B. (2014). Overview and modeling of mechanical and thermomechanical impact of underground coal gasification exploitation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(4), 547–576. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9542-y>
16. Liu, X., Guo, G., & Li, H. (2020). Thermo-mechanical coupling numerical simulation method under high temperature heterogeneous rock and application in underground coal gasification. *Energy Exploration & Exploitation*, 38(4), 1118–1139. <https://doi.org/10.1177/0144598719888981>
17. 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>
18. Kolokolov, O.V. (2000). *Teoriya i praktika termohimicheskoy tehnologii dobyichi i pererabotki uglya.* Dnepropetrovsk, Ukraina: NGA.
19. Perkins, G. (2018). Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 67, 234–274. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.03.002>
20. Feng, L., Zhang, G., & Zhai, R. (2024). Study on gasification reaction and energy conversion characteristics of the entrained flow coal gasification based on chemical kinetics simulation. *Helvion*, 10(10), e30997. <https://doi.org/10.1016/j.helivon.2024.e30997>
21. Saik, P. B., & Berdnyk, M. H. (2024). Mathematical model for heat transfer during underground coal gasification process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 19–24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/019>

ABSTRACT

Purpose. The purpose of this study is to systematize the physicochemical reactions of gasification of carbon-containing raw materials, to develop equations for evaluating the process efficiency, and to determine the interrelationships between its primary energy and technological parameters.

Methods. The methodology is based on the study of physicochemical reactions during the gasification of carbon-containing materials, through the analysis, generalization, and systematization of scientific data on the mechanisms that occur at the stages of drying, pyrolysis, oxidation, and reduction. To assess the efficiency of the process, graphical dependencies of the main parameters were constructed in relative units (0 – 1) as functions of the degree of carbon conversion into combustible generator gases. Relative parameter values were obtained by normalizing experimental and calculated data to a unified dimensionless scale, which allows generalization of the results and comparison of the energy and technological characteristics of the process, revealing patterns in their interrelation.

Results. Methodological principles for assessing the efficiency of gasification of carbon-containing mining waste have been developed. The interrelationships between the energy and technological parameters of the gasification process have been established. The obtained results reflect the regularities of the transition of the gasification process of carbonaceous feedstock to an energy-efficient mode, which provides a basis for further optimization of its technological conditions and an overall increase in process efficiency.

Originality. The scientific novelty lies in the development of theoretical foundations for analyzing the energy of gasification processes for carbon-containing mining waste. For the first time, an approach has been proposed to represent gasification process parameters in relative units, which ensures the possibility of their comparison and generalization.

Practical implication. A methodology has been developed to evaluate the efficiency of the gasification process by analyzing the interrelationships between its primary energy and technological parameters. This enables the determination of the optimal operating modes of the system, the improvement of its energy efficiency, and the justification of technological solutions for the practical implementation of thermochemical conversion processes of carbon-containing waste.

Keywords: *underground gasification, carbon-containing raw materials, mining waste, generator gas, efficiency.*

дата першого надходження статті до видання	02.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	03.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	07.09.2025