

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОПТИМУМУ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

***Анотація.** У роботі застосовано рівноважне термодинамічне моделювання для аналізу енергетичної ефективності газифікації вугілля залежно від коефіцієнта витрати окисника. Коефіцієнт витрати окисника розглядається як неперервний керувальний параметр, а аналіз ґрунтується на узгодженому дослідженні рівноважної температури процесу, складу, теплоти згоряння та питомого виходу генераторного газу.*

Встановлено, що реакція зазначених параметрів на зміну коефіцієнта витрати окисника має стійку тристадійну структуру, яка включає область неповного перетворення, оптимальну область та область надлишкового окислення. Показано, що зміна коефіцієнта витрати окисника призводить до узгодженої трансформації складу газу, зокрема до максимуму сумарної горючої складової та мінімуму продуктів окислення при значенні близько 0,3. Показано, що температура процесу зростає монотонно зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника і не визначає положення енергетичного оптимуму, зростання температури та виходу газу після певного значення коефіцієнта витрати окисника вже не компенсує зниження його теплоти згоряння. Запропоновано інтегральний енергетичний показник, який враховує одночасно вихід газу та його теплоту згоряння. Встановлено, що цей показник має чіткий максимум при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3 для всіх досліджених умов. Отримані результати дозволяють розглядати зазначене значення як універсальну характеристичну точку процесу газифікації, що визначається його внутрішньою термодинамічною структурою та відповідає області раціональних режимів із мінімальними окислювальними втратами.

***Ключові слова:** газифікація, вугілля, термодинамічний аналіз, коефіцієнт витрати окисника, генераторний газ, енергетичний оптимум, інтегральний енергетичний показник*

Постановка проблеми. Вугілля залишається важливою складовою глобальної енергетичної системи навіть в умовах декарбонізації та активного впровадження відновлюваних джерел енергії. За даними [1] та прогнозами [2], воно й надалі відіграватиме суттєву роль у виробництві електроенергії та забезпеченні промислових процесів. У цих умовах підвищення ефективності термохімічної конверсії вугілля є ключовим завданням для зниження викидів та підвищення стійкості енергетичних систем.

Газифікація вугілля є однією з базових технологій, що дозволяє реалізувати кероване перетворення палива з отриманням генераторного газу, теплової енергії та проміжних продуктів. Ефективність цього процесу визначається складною взаємодією температурного режиму, складу газової фази та ступеня перетворення палива. Одним із ключових параметрів, що визначає перебіг газифікації, є коефіцієнт надлишку окисника, який контролює співвідношення між відновлювальними та окислювальними процесами. Разом з тим аналіз отриманих у роботі результатів показує, що ефективність газифікації не може бути адекватно описана через окремі показники, такі як склад газу, температура або теплотворна здатність.

Таким чином, виникає проблема відсутності узгодженого підходу до визначення оптимального режиму газифікації, який враховував би спільну поведінку термодинамічних та енергетичних параметрів процесу, а не їх ізольований аналіз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значна кількість сучасних досліджень присвячена аналізу впливу коефіцієнта надлишку окисника на окремі параметри процесу газифікації вугілля або біомаси, що дозволило встановити типові закономірності та сформулювати базове уявлення про роль кількості окисника у процесах газифікації.

У роботі [3] досліджено газифікацію у псевдозрідженому шарі та показано, що зміна коефіцієнта надлишку окисника призводить до монотонних змін якості генераторного газу. Зокрема, використання повітря супроводжується зниженням теплотворної здатності, тоді як застосування киснево-парових середовищ сприяє підвищенню вмісту водню. Отримані оптимальні значення коефіцієнта надлишку окисника відображають специфіку реакторної

конфігурації та прийнятого визначення параметра, однак аналіз обмежується показниками без детального розгляду структури залежностей у різних областях.

У дослідженні [4] за допомогою чисельного моделювання підземної газифікації встановлено істотний вплив коефіцієнта надлишку окисника на температурні поля, стабільність процесу та утворення CO. Показано, що оптимальне значення коефіцієнта надлишку окисника забезпечує найбільш стабільний режим, проте основна увага приділяється гідродинамічним аспектам, тоді як термодинамічні закономірності зміни складу газу залишаються поза детальним аналізом.

Аналогічні залежності наведені в роботах [5, 6] присвячених газифікації біомаси. Зокрема, показано, що підвищення коефіцієнта надлишку окисника призводить до зниження об'ємної теплотворної здатності генераторного газу та зміни співвідношення CO/H₂. У роботі [7] продемонстровано чітке розмежування режимів горіння, піролізу та газифікації в широкому діапазоні значень коефіцієнта надлишку окисника. Водночас ці дослідження базуються переважно на макроскопічних тенденціях і не передбачають аналізу можливих структурних особливостей поведінки системи у проміжних областях зміни параметра.

У роботі [8] застосовано багатокритеріальну оптимізацію процесу газифікації біомаси, що підтвердило типовий характер впливу коефіцієнта надлишку окисника, а саме зростання ступеня конверсії та зниження теплотворної здатності генераторного газу зі збільшенням кількості окисника. Подібні результати наведені в [9], де також встановлено систематичні зміни температури, складу газу та побічних продуктів, однак без детального аналізу термохімічної структури залежностей.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із впливом газифікуючого агента. Показано, що заміна повітря на киснево-збагачені або парові середовища істотно змінює реакційні шляхи, температурний рівень і склад генераторного газу. У роботі [10] встановлено, що збагачення повітря киснем підвищує теплотворну здатність газу, але супроводжується зменшенням його виходу та збільшенням втрат вуглецю. У дослідженні [11] показано вплив складу середовища та мінеральної складової палива на реакційну здатність і склад газу, однак без аналізу неперервної поведінки системи в залежності від

коефіцієнта надлишку окисника. Робота [12] також базується на рівноважному моделюванні та оптимізації, проте орієнтована на визначення допустимих робочих областей за інтегральними критеріями.

Окрім цього, газифікація розглядається як складова інтегрованих енергетичних систем [13, 14], де аналізуються теплові та ексергетичні потоки. Проте такі підходи орієнтовані на системний рівень і не розкривають детальної термодинаміки процесу безпосередньо в газифікаторі.

Аналіз наукової літератури показує, що існуючі дослідження здебільшого розглядають вплив коефіцієнта надлишку окисника на окремі параметри процесу та встановлюють переважно відокремлені ізольовані залежності. При цьому взаємозв'язок між температурою, складом газу, виходом газу та енергетичними показниками, який визначає формування оптимального режиму газифікації, залишається недостатньо дослідженим. Це обумовлює необхідність комплексного аналізу їх узгодженої поведінки в широкому діапазоні значень коефіцієнта надлишку окисника.

Мета дослідження. Метою даної роботи є встановлення закономірностей формування енергетичного оптимуму та інтегрального енергетичного показника процесу газифікації вугілля на основі узгодженого аналізу температури, складу та виходу генераторного газу та у широкому діапазоні значень коефіцієнта надлишку окисника.

Викладення основного матеріалу дослідження. Досліджено газифікації кам'яного вугілля марки Д з зольністю 28%, яке використовується на теплових електростанціях, енергетичному секторі та в промисловості України.

Дослідження проводилося за допомогою NASA CEA [15], призначеного для розрахунку складу і властивостей довільних систем з хімічними і фазовими перетвореннями. В основі математичної моделі лежить термодинамічний підхід, заснований на мінімізації відповідного термодинамічного потенціалу. Такий підхід часто використовується при дослідженнях термохімічних процесів і дозволяє отримувати якісні результати [16-18].

Процес газифікації вугілля досліджувався при тиску 0,1 МПа. В якості окисника використовувався повітря, повітря, збагачене киснем (35%, 50%, 75 % кисню у повітрі), і кисень. При цьому параметр коефіцієнта надлишку окисника α (відношення фактичної витрати окисника в процесі газифікації до

витрати окисника при стехіометричному співвідношенні для повного горіння) змінювався в діапазоні 0,2-0,5.

На рисунку 1 наведено результати дослідження впливу коефіцієнта витрати окисника α на утворення горючої складової генераторного газу.

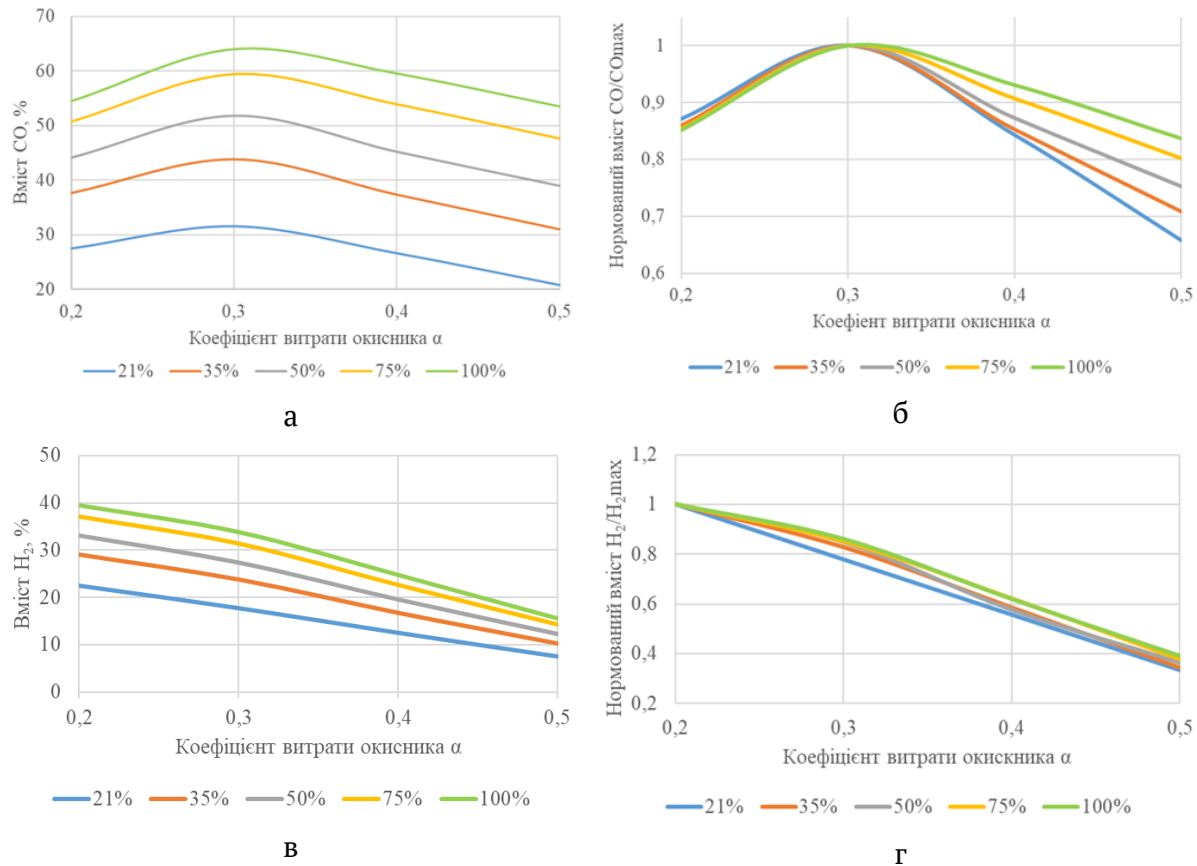


Рисунок 1 – Формування горючої складової генераторного газу залежно від коефіцієнта витрати окисника

Отримані результати вмісту CO залежно від коефіцієнта витрати окисника (рис. 1а) дозволяють виділити область максимального утворення CO, яка формується в інтервалі значень коефіцієнта витрати окисника 0,3-0,32 та зміщується в область вищих значень концентрації при збільшенні частки кисню в дутті. При зменшенні коефіцієнта витрати окисника щодо максимуму вміст CO зменшується, у зв'язку з тим, що окисника недостатньо для повної переробки вуглецю, що підтверджується наявністю непрореагованого вуглецю.

Нормування залежностей CO/CO_{max} показало (рис. 1б), що для всіх досліджених ступенів кисневого збагачення максимум вмісту CO досягається

практично в одній і тій самій області коефіцієнта витрати окисника близько 0,3-0,32. Це свідчить про наявність квазіуніверсальної області оптимуму за коефіцієнтом витрати окисника, тоді як зміна частки кисню в дутті впливає переважно на абсолютний рівень концентрації CO, а не на положення максимуму. Водночас зі збільшенням кисню в повітрі зменшується швидкість спаду нормованого вмісту CO/CO_{max} при коефіцієнті витрати окисника більше 0,3, що свідчить про розширення області режимів, у яких зберігається високий рівень утворення CO.

Як видно з результатів досліджень, зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника вміст H_2 у генераторному газі зменшується практично монотонно для всіх досліджених ступенів кисневого збагачення (рис. 1в). Це свідчить про високу чутливість водневої складової до посилення окислювального режиму та відсутність локального оптимуму за даним показником. На відміну від CO, для якого характерна наявність максимуму, поведінка H_2 визначається переважанням реакцій його окислення та зміщенням рівноваги системи $CO-H_2O-CO_2-H_2$ у бік утворення водяної пари. Це підтверджує, що оптимальний режим газифікації не може визначатися за окремими компонентами, а має встановлюватися з урахуванням їх узгодженої зміни.

Нормування залежностей H_2/H_{2max} показало (рис. 1г), що для всіх досліджених ступенів кисневого збагачення максимальний вміст H_2 досягається при мінімальному значенні коефіцієнта витрати окисника 0,2, після чого спостерігається монотонне зниження. Близькість нормованих кривих свідчить про подібний характер впливу коефіцієнта витрати окисника на водневу складову генераторного газу незалежно від вмісту кисню в повітрі. При цьому зі зростанням частки кисню відносно зменшення H_2 дещо уповільнюється.

На рисунку 2 наведено результати дослідження впливу коефіцієнта витрати окисника α на вміст відновлювальних компонентів (CO, H_2) та продуктів окислення (CO_2 , H_2O).

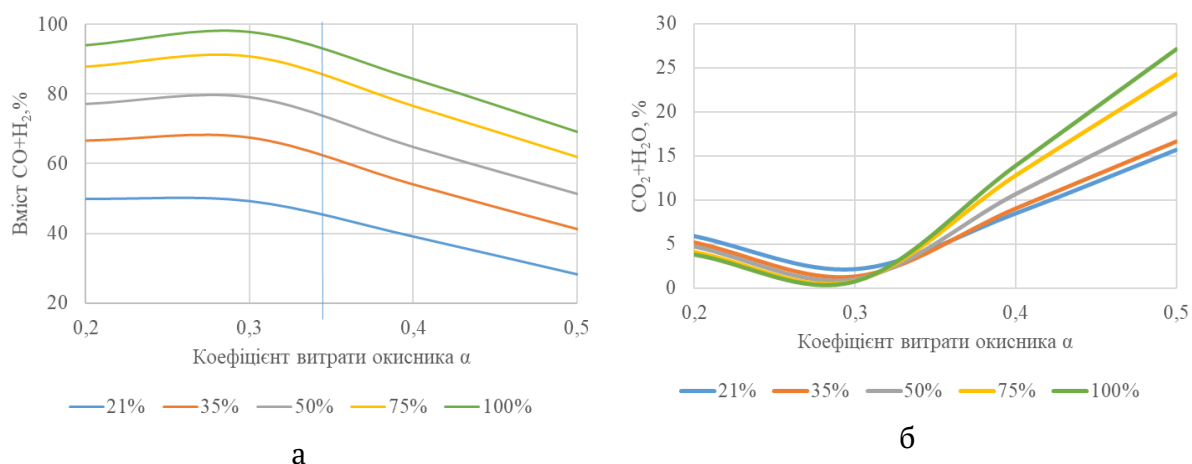


Рисунок 2 – Формування відновлювальних компонентів ($\text{CO} + \text{H}_2$) та продуктів окислення ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) залежно від коефіцієнта витрати окисника

Аналіз сумарної горючої складової генераторного газу показав (рис. 2а), що при всіх видах окисника характерна наявність максимуму при коефіцієнті витрати окисника 0,3-0,32, який відповідає енергетично оптимальному режиму газифікації. На відміну від окремих компонентів, для яких спостерігаються різні закономірності зміни, сумарне значення відновлювальних компонентів ($\text{CO} + \text{H}_2$) відображає узгоджену поведінку системи і може бути використаний як інтегральний критерій вибору режиму.

Сумарні окиснювальні втрати (рис. 2б), оцінені за показником кількості продуктів окислення ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), при всіх видах окисника досягають мінімуму при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3. При відхиленні від цього значення в бік більших значень коефіцієнта витрати окисника спостерігається різке зростання сумарних втрат, яке посилюється зі збільшенням частки кисню в окиснику. Це підтверджує, що область коефіцієнта витрати окисника 0,3-0,32 відповідає не лише максимуму горючої складової генераторного газу, але й мінімуму сукупних окиснювальних втрат процесу.

Для якісного індикатора ефективності газифікації за складом генераторного газу пропонується використовувати відношення $\lg((\text{CO} + \text{H}_2)/\text{CO}_2)$, значення якого наведено на рисунку 3.

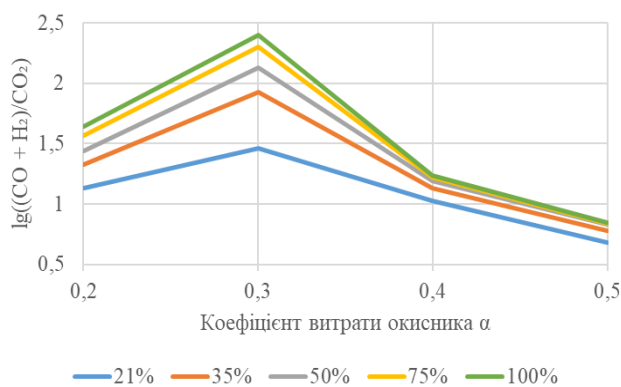


Рисунок 3 – Індикатор ефективності газифікації за паливною складовою

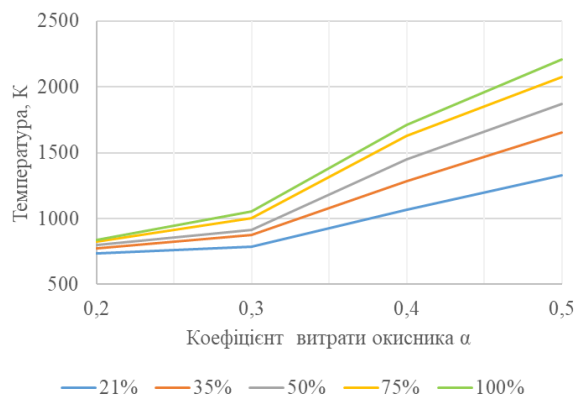


Рисунок 4 – Температура газифікації залежно від коефіцієнта витрати окисника

Наявність максимального значення відношення $\lg((CO + H_2)/CO_2)$ свідчить про існування універсальної області енергетично оптимального режиму газифікації, яка визначається узгодженою зміною складу генераторного газу та мінімізацією окислювальних втрат, при цьому підвищення кількості кисню в окиснику посилює якість газу, але не зміщує оптимум, який існує при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3.

Отримані результати демонструють наявність трьох характерних областей процесу газифікації: при малих значеннях коефіцієнта витрати окисника (область I) спостерігається неповне перетворення вуглецю; при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3 (область II) формується енергетично оптимальний режим за паливною складовою, що відповідає максимуму сумарної горючої складової ($CO + H_2$); при подальшому зростанні коефіцієнта витрати окисника (область III) відбувається надлишкове окислення, що призводить до зниження вмісту горючих компонентів газу.

Оптимальний режим газифікації визначається як максимумом паливної складової, а й умовою досягнення достатнього температурного рівня, що забезпечує повний перебіг реакцій газифікації вуглецю. Результати дослідження впливу складу та кількості окисника на температурний рівень процесу газифікації наведено на рисунку 4.

Отримані залежності температури показують, наявність явно виражених трьох температурних областей, межі яких співпадають з областями кардинальної зміни складу генераторного газу. При малих значеннях коефіцієнта витрати окисника (область I) температура процесу є недостатньою

для повного протікання реакцій газифікації, що призводить до наявності непрореагованого вуглецю. Зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника температура різко зростає, забезпечуючи повне перетворення палива (область II), однак подальше підвищення коефіцієнта витрати окисника супроводжується окрім підвищення температури (область III) надлишковим окисленням і зниженням вмісту горючих компонентів газу. Таким чином, дослідження показали, що область раціональних режимів визначається одночасним виконанням температурного критерію та максимуму сумарної горючої складової ($\text{CO} + \text{H}_2$).

Важливими показниками для оцінки енергетичної ефективності процесу газифікації є вихід та теплота згоряння генераторного газу. Параметри генераторного газу залежно від коефіцієнта витрати окисника наведено на рисунку 5.

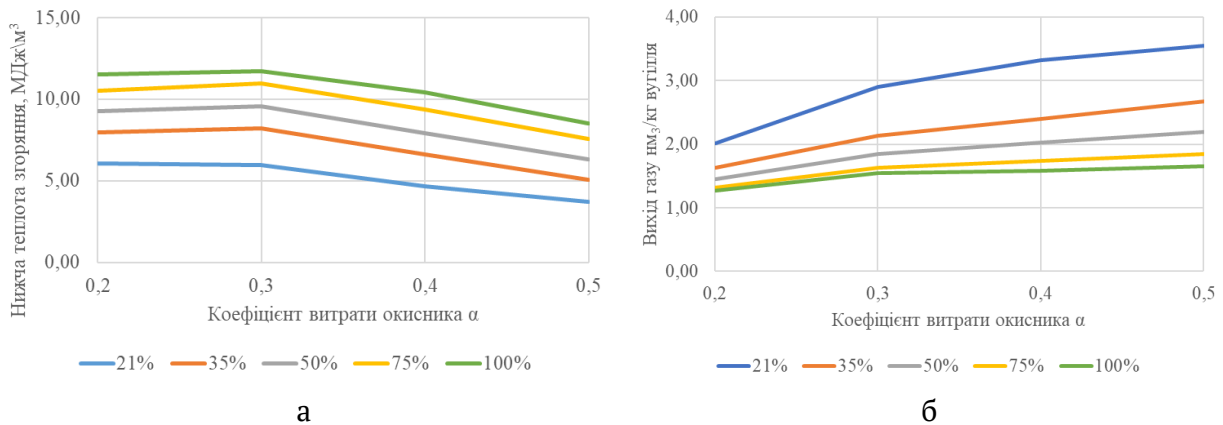


Рисунок 5 – Значення нижчої теплоти згоряння (а) та вихід генераторного газу (б) залежно від коефіцієнта витрати окисника

Встановлено, що для всіх значень видів окисника нижчої теплоти згоряння генераторного газу досягається при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3, це відповідає області одночасного максимуму горючих компонентів та мінімуму продуктів окислення (рис. 5а). Так для повітряної газифікації теплота згоряння газу становить 5,5-6 МДж/м³, а при кисневій газифікації 11,5-12 МДж/м³. Отриманий генераторний газ залежно від теплоти згоряння, склад і технології може використовуватися як паливний газ, як відновлювальний в металургійному виробництві, при організації парогазових циклів, а також як хімічна сировина. Збільшення коефіцієнта витрати окисника

призводить до зростання виходу генераторного газу (рис. 5б), однак це супроводжується зниженням його теплотворної здатності та зростанням окиснювальних втрат, що свідчить про недоцільність оцінки ефективності процесу лише за об'ємом утвореного газу. Як видно, найбільший вихід генераторного газу спостерігається при повітряній газифікації, що пояснюється великим вмістом баластного азоту

Як сказано раніше, у більшості досліджень ефективність газифікації оцінюється за теплотворною здатністю генераторного газу або за його складом. Ці показники характеризують якість газу, однак не відображають загальну кількість хімічної енергії, отриманої з одного кілограма палива. Унаслідок цього повітряна газифікація часто інтерпретується як енергетично не вигідна через низьке значення теплоти згоряння газу. Такий висновок ґрунтується виключно на властивостях газу в перерахунку на одиницю об'єму й не враховує сумарний вихід газу.

Для отримання фізично узгодженого показника в цій роботі використано інтегральний енергетичний показник, визначений як добуток об'ємного виходу газу при газифікації та його об'ємної нижчої теплоти згоряння $V_r \times Q_n$. Цей параметр відображає загальну кількість енергії, переданої від вугілля до генераторного газу, і забезпечує безпосередню основу для порівняння газифікації при використанні різних видів окисника без спотворень, притаманних використанню лише теплоти згоряння газу. Отримані дані щодо значень інтегрального енергетичного показника для газифікації з різним типом окисника наведено на рисунку 6.

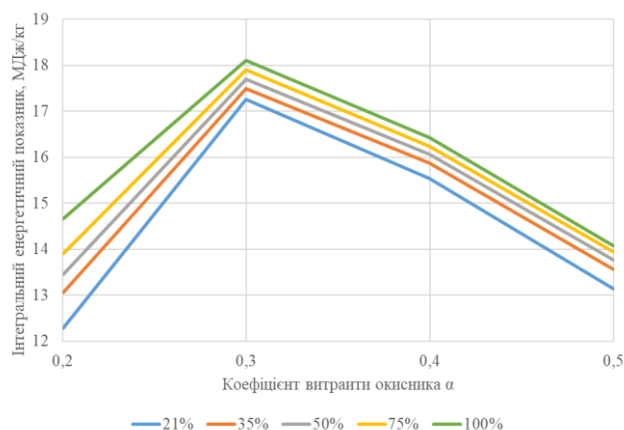


Рисунок 6 – Інтегральний енергетичний показник процесу газифікації

Аналіз інтегрального енергетичного показника показав, що для всіх видів окисника максимум досягається при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3. При подальшому зростанні коефіцієнта витрати окисника, незважаючи на збільшення виходу газу, спостерігається зниження $V_r \times Q_n$, що зумовлено зменшенням теплоти згоряння генераторного газу внаслідок інтенсифікації окислювальних процесів.

Отримані результати підтверджують, що інтегральний енергетичний показник забезпечує більш коректне представлення процесу газифікації, ніж використання лише окремих показників, такі як склад газу, температура або теплотворна здатність. Хоча теплота згоряння генераторного газу при повітряній газифікації є низькою, вихід газу є значним, і сумарна кількість хімічної енергії, отриманої з одного кілограма вугілля, у області, близькій до максимуму, є порівнянною з кисневою газифікацією. Поширене уявлення про те, що повітряна газифікація є «енергетично слабкою», виникає внаслідок оцінювання виключно якості газу в перерахунку на одиницю об'єму. Інтегральний критерій, використаний у цій роботі, усуває це обмеження та показує, що максимальний енергетичний вихід для всіх видів окисників має однаковий порядок величини та енергетичний максимум є чітко визначеною характерною точкою, яка формується при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3.

Висновки. Встановлено, що область раціональних режимів газифікації обмежується з одного боку зоною недостатньої окислювальної забезпеченості, у якій спостерігається наявність непрореагованого вуглецю, а з іншого – областю надлишкового окислення, що призводить до зниження вмісту горючих компонентів газу. У межах цих обмежень формується енергетично оптимальний режим процесу, що відповідає максимуму сумарної горючої складової. Показано, що сумарна горюча складова газу досягає максимуму при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3, тоді як продукти окислення у цій області мають мінімальні значення. Це дозволяє ідентифікувати зазначений діапазон як область мінімальних окислювальних втрат і максимального енергетичного потенціалу генераторного газу.

Встановлено, що використання логарифмічного показника $\lg((CO+H_2)/CO_2)$ дозволяє отримати стійкий критерій оцінки режиму газифікації. Показано, що

для всіх досліджених умов максимум цього показника відповідає значенню коефіцієнта витрати окисника близько 0,3. Зазначений режим відповідає одночасному досягненню максимуму сумарної горючої складової ($\text{CO}+\text{H}_2$) та мінімуму вмісту CO_2 , що свідчить про реалізацію оптимального відновлювально-окислювального балансу процесу газифікації. Отримані результати дозволяють перейти від аналізу окремих компонентів до системного визначення раціонального режиму процесу.

Показано, що температура процесу газифікації зростає монотонно зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника і не має максимуму в області енергетичного оптимуму. Це свідчить про те, що оптимальний режим визначається не максимальним температурним рівнем, а досягненням балансу між достатньою температурою процесу та мінімізацією втрат, пов'язаних з окисленням.

Встановлено, що енергетичний оптимум процесу газифікації формується як результат узгодженої зміни виходу генераторного газу та його теплотворної здатності, що адекватно описується інтегральним енергетичним показником $V_{\text{r}} \times Q_{\text{н}}$. Показано, що цей показник має чітко виражений максимум при коефіцієнті витрати окисника близько 0,3 для всіх досліджених умов, незважаючи на протилежний характер зміни його складових (зростання виходу газу та зниження його теплотворної здатності при збільшенні подачі окисника). Це свідчить про те, що положення оптимального режиму визначається внутрішньою термодинамічною структурою процесу та відповідає області мінімальних окислювальних втрат, у якій досягається максимальний сумарний енергетичний вихід генераторного газу.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. International Energy Agency, World Energy Outlook 2025, IEA, Paris, France, Analytical Services, 2025, pp. 517, Nov. 12, 2025, from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>.
2. British Petroleum, BP Energy Outlook 2025, BP, London, UK, Market research, pp. 56, 2025, from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2025.pdf>
3. Aydar, E., Gul, S., Unlu, N., Akgun, F. and Livatyali, H., Effect of the Type of Gasifying Agent on Gas Composition in a Bubbling Fluidized Bed Reactor, J. Energy Inst., vol. 87, no. 1, pp. 35–42, 2014, DOI: 10.1016/j.joei.2014.02.004.

4. Biswas, A. K., Suksuwan, W., Phoungthong, K. and Wae-hayee, M., Effect Of Equivalent Ratio (ER) On the Flow and Combustion Characteristics in A Typical Underground Coal Gasification (UCG) Cavity, *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 86, no. 2, pp. 28–38, 2021, DOI: 10.37934/arfmts.86.2.2838.
5. Sher, F., Hameed, S., Smječanin Omerbegović, N., Chupin, A., Ul Hai, I., Wang, B., Heng Teoh, Y. and Joka Yildiz, M., Cutting-Edge Biomass Gasification Technologies for Renewable Energy Generation and Achieving Net Zero Emissions, *Energy Convers. Manag.*, vol. 323, p. 119213, 2025, DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119213.
6. Zhu, D., Wang, Q., Xie, G., Ye, Z., Zhu, Z. and Ye, C., Effect of Air Equivalence Ratio on the Characteristics of Biomass Partial Gasification for Syngas and Biochar Co-Production in the Fluidized Bed, *Renew. Energy*, vol. 222, p. 119881, 2024, DOI: 10.1016/j.renene.2023.119881.
7. Clemente-Castro, S., Palma, A., Ruiz-Montoya, M., Giráldez, I. and Díaz, M. J., Comparative Study of the Combustion, Pyrolysis and Gasification Processes of *Leucaena Leucocephala*: Kinetics and Gases Obtained, *Heliyon*, vol. 9, no. 7, p. e17943, 2023, DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17943.
8. Habibollahzade, A., Ahmadi, P. and Rosen, M. A., Biomass Gasification Using Various Gasification Agents: Optimum Feedstock Selection, Detailed Numerical Analyses and Tri-Objective Grey Wolf Optimization, *J. Clean. Prod.*, vol. 284, p. 124718, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124718.
9. Silva, I. P., Silva, B. R. S., Santana, H. E. P., Souza, W. L., Silva, G. F., Ruzene, D. S. and Silva, D. P., Operational Assessment of Downdraft Gasification of Agricultural Residues from Cassava Cultivation, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 114, pp. 326–336, 2025, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.427.
10. Mastellone, M. L., Zaccariello, L., Santoro, D. and Arena, U., The O₂-Enriched Air Gasification of Coal, Plastics and Wood in a Fluidized Bed Reactor, *Waste Manag.*, vol. 32, no. 4, pp. 733–742, 2012, DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.005.
11. Yang, Z., Zhang, L., Peng, J. and Guo, M., Gasification of Inferior Coal with High Ash Content under CO₂ and O₂/H₂O Atmospheres, *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 10, pp. 1046–1053, 2015, DOI: 10.1080/15435075.2014.962031.
12. Dave, P. P., Shah, P. D., Poonawala, T. Y., Channiwala, S. A. and Parikh, J. K., Determination of Optimally Feasible Operating Parameters for Gasification of High-Ash-Content Coal, *MRS Energy Sustain.*, vol. 10, no. 1, pp. 100–112, 2023, DOI: 10.1557/s43581-022-00056-6.
13. Piazzzi, S., Patuzzi, F. and Baratieri, M., Energy and Exergy Analysis of Different Biomass Gasification Coupled to Fischer-Tropsch Synthesis Configurations, *Energy*, vol. 249, p. 123642, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123642.
14. Yang, S., Ren, Q., Han, S., Cui, R., Hu, Y., Heng, Y., Dong, S., Li, L., Gong, M., Liang, C., Guo, S., Fang, N. and Li, W., Coal Gasification-Combustion System – Part I: Principle and Nitrogen Migration Characteristics, *Fuel*, vol. 398, p. 135527, 2025, DOI: 10.1016/j.fuel.2025.135527.
15. <https://www.nasa.gov/glenn/research/chemical-equilibrium-with-applications/>
16. Ratnadhariya, J. K. and Channiwala, S. A., Three Zone Equilibrium and Kinetic Free Modeling of Biomass Gasifier - a Novel Approach, *Renew. Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1050–1058, 2009, DOI: 10.1016/j.renene.2008.08.001.
17. Pinchuk, V. A. and Sharabura, T. A., Computer modeling of coal-water fuel gasification process using an equilibrium thermodynamic model, in *Inf. Support Decis.-Mak. Syst. Econ. Eng. Organ. Fields*, Donetsk: LANDON-XXI, pp. 354–371, 2013, from https://modern.science.triacon.org/valeriya.pinchuk/2013_12.pdf
18. Li, L., Zhou, L., Ren, Q., Cui, R., Yang, S., Li, W. and Dong, S., Influence of Ash Composition on Slag Properties and Network Structure in Coal Gasification Fine Slag: A High-Temperature Melting Perspective, *Energy*, vol. 329, p. 136816, 2025, DOI: 10.1016/j.energy.2025.136816.

UDC 662.764

Olena Tutova, Valeriia Pinchuk

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ENERGY OPTIMUM FORMATION IN COAL GASIFICATION

Abstract. *Equilibrium thermodynamic modeling was applied to analyze the energy efficiency of coal gasification as a function of the oxidizer consumption coefficient. The oxidizer consumption coefficient is considered as a continuous control parameter that determines the balance between reduction and oxidation processes, and the analysis is based on the coordinated evaluation of equilibrium temperature, producer gas composition, its heating value, and specific gas yield. It is shown that variation of the oxidizer consumption coefficient leads not to isolated changes of individual parameters, but to their interrelated transformation with a clearly pronounced structural character. It is established that within the studied range, a three-stage structure of the process is formed, including a region of incomplete conversion with the presence of unreacted carbon, a region of rational operating conditions, and a region of excessive oxidation accompanied by a decrease in the content of combustible gas components. It is shown that transitions between these regions are characterized by changes in the behavior of the main parameter dependencies, reflecting a shift in the balance between dominant thermochemical processes.*

It is established that within the region of rational operating conditions, an energy-optimal gasification regime is formed, corresponding to the maximum of the total combustible fraction of the producer gas and the minimum of oxidation products. It is shown that this regime is realized at an oxidizer consumption coefficient of approximately 0.3 and corresponds to the region of minimal oxidation losses. The introduction of the logarithmic indicator $\lg((\text{CO}+\text{H}_2)/\text{CO}_2)$ made it possible to obtain a stable criterion for evaluating the gasification regime, ensuring unambiguous identification of the optimum region. It is shown that the maximum of this indicator coincides with the maximum of the total combustible fraction and the minimum of oxidation products, confirming the realization of an optimal reduction–oxidation balance.

It is established that the gasification temperature increases monotonically with increasing oxidizer consumption coefficient and does not determine the position of the

energy optimum. It is shown that beyond a certain value of the oxidizer consumption coefficient, further increases in temperature and gas yield no longer compensate for the decrease in gas heating value, resulting in reduced energy efficiency. To generalize the obtained results, an integral energy indicator was proposed, which simultaneously accounts for the producer gas yield and its heating value. It is established that this indicator exhibits a well-defined maximum at an oxidizer consumption coefficient of approximately 0.3 for all investigated conditions, despite the opposite trends of its components.

The obtained results show that the energy optimum of the gasification process is formed as a result of coordinated variation of process parameters and is determined by its internal thermodynamic structure. This makes it possible to move from the analysis of individual characteristics to a system-based identification of the rational gasification regime corresponding to minimal oxidation losses and maximum total energy output of the producer gas.

Keywords: gasification, coal, thermodynamic analysis, oxidizer consumption coefficient, producer gas, energy optimum, integral energy indicator

Тутова Олена Валеріївна - аспірант, Український державний університет науки і технологій, e-mail: riasnovaelen@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6846-0327>

Пінчук Валерія Олександрівна - доктор техн. наук, проф., завідувач кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», e-mail: Pinchuk.V.O@nmu.one

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7684-1867>

Tutova Olena Valeriyivna - junior researcher, Ukrainian State University of Science and Technologies, e-mail: riasnovaelen@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6846-0327>

Pinchuk Valeriia Oleksandrivna - Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department of Thermal Engineering And Energy Technology of the Dnipro University of Technology, e-mail: Pinchuk.V.O@nmu.one

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7684-1867>