

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ДОСКОНАЛОСТІ ДВОСТАДІЙНОЇ СХЕМИ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ

Анотація. Підвищення ефективності використання твердого палива потребує оцінки термодинамічної досконалості процесів його переробки з позицій ексергетичного аналізу. У роботі досліджено двостадійний процес термохімічної переробки вугілля, а саме повітряна газифікація вугілля з подальшим спалюванням генераторного газу різних параметрів за двома схемами – без попереднього охолодження газу перед спалюванням та з його охолодженням.

Виконано дослідження ексергетичної ефективності цих схем при різному складі та температурі отриманого генераторного газу (800-1800 °С) та визначено ККД ексергетичної досконалості (загального, за одержанням хімічної та фізичної ексергії). Встановлено наявність температурного оптимуму ексергетичного ККД процесу газифікації без охолодження генераторного газу в області 1000-1100 °С, де ККД досягає максимального значення близько 63,0 %. У разі використання охолодження генераторного газу максимум ККД зміщується в область 1200-1300 °С і досягає близько 65,0 %. Показано, що попереднє охолодження генераторного газу змінює структуру ексергетичних потоків за рахунок формування додаткового теплового потенціалу, придатного для подальшої утилізації та забезпечує підвищення ексергетичного ККД на 1,5-7,0 % залежно від початкових параметрів газу.

Ключові слова: газифікація вугілля, генераторний газ, ексергетичний аналіз, ексергетичний баланс, термодинамічна ефективність, фізична ексергія, хімічна ексергія, ексергетична досконалість

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку енергетики та посилення вимог до раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів підвищення ефективності процесів термічної переробки вугілля набуває особливої актуальності. Традиційні підходи до оцінки енергетичних характеристик не забезпечують повного врахування якості енергії та ступеня її деградації внаслідок необоротних процесів, що зумовлює доцільність застосування ексергетичного аналізу як більш інформативного інструменту термодинамічної оцінки.

Серед перспективних напрямів використання вугілля є його газифікація з подальшим спалюванням генераторного газу. Цей підхід забезпечує гнучке управління енергетичними потоками та створює передумови для підвищення ефективності енергетичних установок. Водночас ефективність таких процесів суттєво залежить від пара-

метрів генераторного газу та технологічної схеми його подальшого використання, що визначає структуру ексергетичних потоків і величину втрат.

У науковій літературі широко представлені ексергетичні оцінки окремих процесів термохімічної переробки вугілля, зокрема піролізу, газифікації та згоряння. Водночас комплексні ексергетичні дослідження, що охоплюють узагальнені технологічні схеми з урахуванням взаємодії процесів і впливу режимних параметрів, представлені обмежено. Це зумовлює необхідність розробки підходів до інтегрованої ексергетичної оцінки таких схем з метою підвищення їх енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ексергетичної оцінки процесів газифікації вугілля активно розглядаються у сучасних дослідженнях останніх років, де основну увагу зосереджено на визначенні структури ексергетичних втрат у газифікаторах та впливу технологічних параметрів на ефективність процесу [1-3]. Авторами встановлено, що суттєва частка втрат ексергії формується внаслідок хімічних перетворень і теплообмінних процесів у реакційній зоні, причому їх величина істотно залежить від температурного режиму та складу газифікуючого агента [2, 4].

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із інтеграцією газифікаційних процесів у складні енергетичні системи, включаючи комбіновані та когенераційні установки, де ексергетичний аналіз використовується для оцінки ефективності перетворення енергії та зниження втрат [3, 5]. У цих роботах підкреслюється необхідність системного підходу до аналізу, який враховує взаємозв'язок між окремими стадіями процесу. Наведені дослідження мають узагальнений характер і, як правило, не враховують детально вплив умов підготовки генераторного газу на подальші стадії його використання.

Водночас у дослідженні [6], присвяченому ексергетичному аналізу процесів термічної переробки вугілля, розглянуто загальні закономірності розподілу ексергії та встановлено визначальну роль співвідношення фізичної та хімічної складових у формуванні ефективності окремих процесів переробки. В роботі показано, що значна частина енергетичного потенціалу концентрується у фізичній ексергії продуктів, що відкриває можливості для її подальшої утилізації.

У більшості сучасних публікацій [7-9] процес газифікації розглядається переважно ізольовано, без урахування подальшого спалювання генераторного газу як складової єдиної технологічної схеми. Недостатньо дослідженим залишається і вплив складу та температури генераторного газу перед спалюванням на структуру ексергетичних потоків та величину втрат, що обмежує можливості оптимізації процесу.

Таким чином, незважаючи на наявність сучасних досліджень у сфері ексергетичного аналізу процесів термічної переробки вугілля, питання комплексної оцінки технологічної схеми «газифікація - спалювання генераторного газу» з урахуванням складу і температури генераторного газу залишаються недостатньо дослідженими, що визначає актуальність подальших досліджень у даному напрямі.

Мета дослідження. Метою роботи є ексергетична оцінка двостадійного процесу термохімічної переробки вугілля, що включає повітряну газифікацію та подальше спа-

лювання генераторного газу за різними схемами. Дослідження спрямоване на встановлення закономірностей впливу початкових параметрів газу та застосування його охолодження перед спалюванням на структуру ексергетичного балансу та ефективність процесу. Це дозволяє визначити оптимальні режими роботи і обґрунтувати шляхи підвищення ексергетичної ефективності використання вугілля.

Викладення основного матеріалу дослідження. У роботі розглянуто дві схеми двостадійного процесу термохімічної переробки вугілля, що включає повітряну газифікацію з подальшим спалюванням генераторного газу без попереднього охолодження та з його охолодженням перед камерою згоряння до температури 120 °С. Залежно від способів (в щільному, киплячому шарі або в потоці) та режимів повітряної газифікації температура генераторного газу становить 800-1800 °С. При згорянні генераторного газу утворюються продукти згоряння такого складу (% об.): $N_2=72,4-72,7$; $CO_2=14,9-15,8$; $H_2O=9,6-10$; $O_2=1,3-0,5$; $SO_2=0,4-0,1$; інші – 0,9-1,4. Вихід продуктів згоряння становить 4,47-5,37 м³/кг вугілля в залежності від початкових параметрів генераторного газу.

Схема процесу без попереднього охолодження генераторного газу перед спалюванням наведена на рисунку 1.

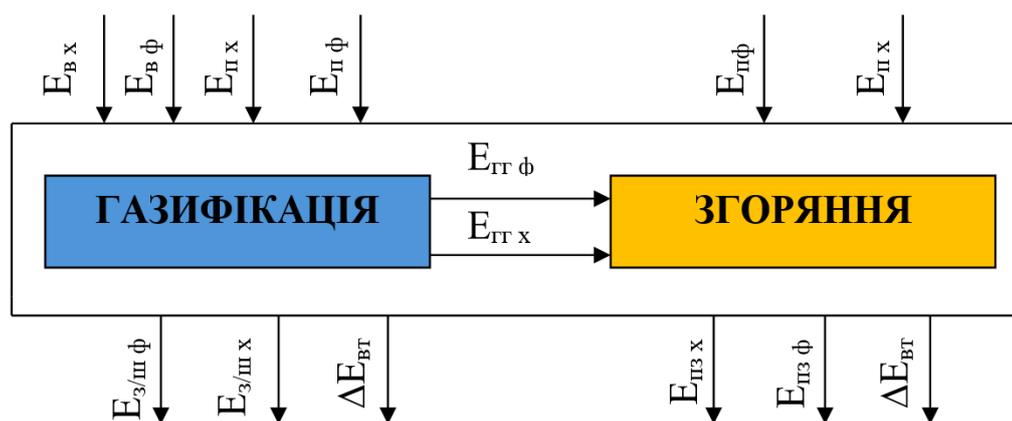


Рисунок 1 – Схема процесу повітряної газифікації вугілля з наступним згорянням генераторного газу без його охолодження перед камерою згоряння

Ексергетичний баланс процесів газифікації і згоряння без охолодження генераторного газу, кДж/кг вугілля (1):

$$E_{вх} + E_{вф} + E_{пх} + E_{пф} = E_{з/шх} + E_{з/шф} + E_{пзх} + E_{пзф} + E_{вт}, \quad (1)$$

Де $E_{вх}$ – хімічна ексергія вугілля;

$E_{вф}$ – фізична ексергія вугілля;

$E_{пх}$ – хімічна ексергія повітря;

$E_{пф}$ – фізична ексергія повітря;

$E_{з/шх}$ – хімічна ексергія золи або шлаку;

$E_{з/шф}$ – фізична ексергія золи або шлаку;

$E_{пзх}$ – хімічна ексергія продуктів згоряння;

$E_{пзф}$ – фізична ексергія продуктів згоряння;

$\Delta E_{вт}$ – ексергетичні втрати.

Відповідно до методик, наведених в [10-12], складені матеріальний і ексергетичний баланси процесів газифікації вугілля та спалювання генераторного газу та визначена ексергетична досконалість двостадійної схеми переробки вугілля. У таблиці 1 наведено приклад матеріального і ексергетичного балансу процесу газифікації з наступним спалюванням генераторного газу з температурою 1000 °С.

Таблиця 1

Матеріальний і ексергетичний баланси процесів газифікації вугілля з наступним спалюванням генераторного газу без його охолодження перед камерою згоряння

Статті балансу	Кількість, кг	Ексергія	
		МДж/кг вугілля	%
Прихід			
Вугілля	1	20,35	99,999
Повітря	6,26	0,0003	0,001
Разом	7,26	20,35	100
Витрата			
Продукти згоряння	7,02	12,54	61,6
Шлак	0,24	0,22	1,1
Ексергетичні втрати	-	7,60	37,3
Разом	7,26	20,35	100

З результатів дослідження видно, що при спалюванні генераторного газу без його охолодження перед камерою згоряння ексергію приходу на 99,9 % становить хімічна ексергія вугілля, що перетворюється в ексергію продуктів згоряння і золи/шлаку. Структура витратної частини процесу газифікації з наступним спалюванням генераторного газу представлена на рисунку 2.

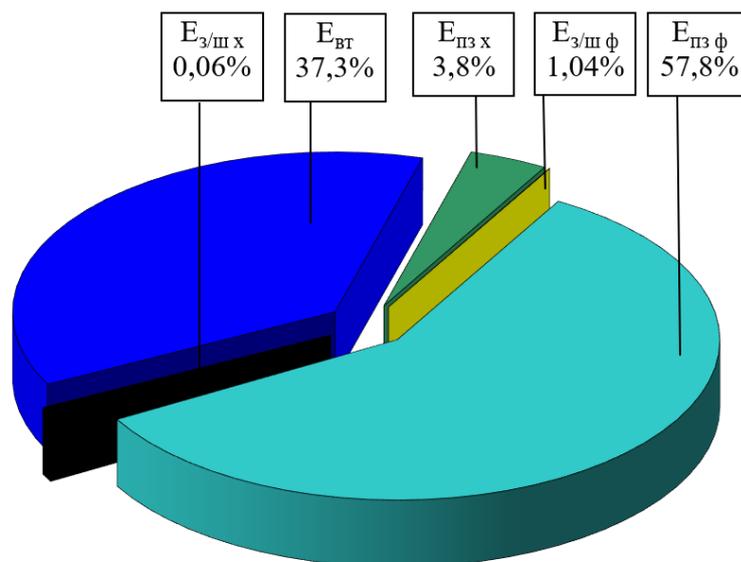


Рисунок 2 – Структура витратної частини процесу повітряної газифікації з наступним спалюванням генераторного газу без його охолодження перед камерою згоряння

Фізична ексергія продуктів згоряння становить більше половини витратної частини балансу, що уможливорює її використання для вироблення носія енергії (пари, гарячої води). Хімічна ексергія шлаку незначна, але можливе її використання як сировини в подальших виробничих процесах. Крім втрат від необоротності згоряння, мають місце втрати в навколишнє середовище, втрати в результаті віднесення вугільних часток і крапель шлаку.

Температура генераторного газу перед камерою згоряння несуттєво впливає на витратну частину ексергетичного балансу. Підвищення температури генераторного газу на 100 °С приводить до зміни складу продуктів згоряння і зниженню їхньої фізичної ексергії на 97 кДж/кг вугілля. Фізична ексергія золи/шлаку за рахунок підвищення температури генераторного газу незначно зростає: збільшення температури на 100 °С підвищує фізичну ексергію золи/шлаку у середньому на 29 кДж/кг вугілля. Так як склад і вихід золи/шлаку залежно від температури газифікації не змінюється, незмінною залишається і хімічна ексергія шлаку, що становить 5 кДж/кг вугілля. За рахунок реакції горіння незначно збільшуються втрати від необоротності процесу згоряння (збільшення температури генераторного газу на 100 °С призводить до збільшення втрат у середньому на 143 кДж).

Встановлено, що значення ексергетичних ККД досконалості процесу газифікації вугілля з наступним спалюванням генераторного газу без його охолодження перед камерою згоряння становлять: $ККД_{заг} = 57-63\%$, $ККД_{хім} = 1-4\%$, $ККД_{фіз} = 57-59\%$ залежно від температури газу перед спалюванням.

Схема процесу з попереднім охолодженням генераторного газу до 120 °С перед спалюванням представлена на рисунку 3.

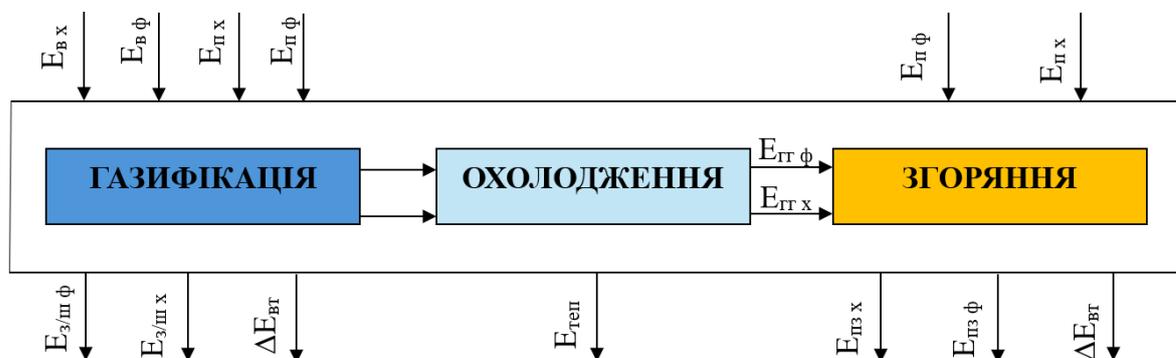


Рисунок 3 – Схема процесу повітряної газифікації вугілля з наступним спалюванням генераторного газу з його охолодженням перед камерою згоряння

Ексергетичний баланс процесів газифікації і згоряння генераторного газу з його охолодження, кДж/кг вугілля (2):

$$E_{вх} + E_{вф} + E_{пх} + E_{пф} = E_{з/шх} + E_{з/шф} + E_{пзх} + E_{пзф} + E_{теп} + \Delta E_{вт}, \quad (2)$$

де $E_{вх}$ – хімічна ексергія вугілля;

$E_{вф}$ – фізична ексергія вугілля;

$E_{пх}$ – хімічна ексергія повітря;

- $E_{пф}$ – фізична ексергія повітря;
 $E_{з/ш х}$ – хімічна ексергія золи або шлаку;
 $E_{з/ш ф}$ – фізична ексергія золи або шлаку;
 $E_{пз х}$ – хімічна ексергія продуктів згоряння;
 $E_{пз ф}$ – фізична ексергія продуктів згоряння;
 $E_{теп}$ – фізичне тепло отримане від охолодження генераторного газу;
 $\Delta E_{вт}$ – ексергетичні втрати.

Відповідно до методик, наведених в [10-12], складені матеріальний і ексергетичний баланси процесів газифікації вугілля та спалювання генераторного газу з використанням його попереднього охолодження та визначена ексергетична досконалість такої схеми. У таблиці 2 наведено приклад матеріального і ексергетичного балансу двостадійної схеми переробки вугілля з використанням охолодження генераторного газу перед камерою згоряння від температури 1000 °С до 120 °С.

Таблиця 2

Матеріальний і ексергетичний баланси процесів газифікації вугілля з наступним спалюванням генераторного газу з його охолодженням перед камерою згоряння

Статті балансу	Кількість, кг	Ексергія	
		МДж/кг вугілля	%
Прихід			
Вугілля	1	20,35	99,999
Повітря	6,26	0,0003	0,001
Разом	7,26	20,35	100
Витрата			
Продукти згоряння	7,02	10,04	49,3
Шлак	0,24	0,22	1,1
Тепло	-	3,14	15,4
Ексергетичні втрати	-	6,95	34,2
Разом	7,26	20,35	100

З результатів дослідження видно, що при згорянні генераторного газу, ексергію приходу на 99,9 % складає хімічна ексергія вугілля, що перетворюється в ексергію продуктів згоряння і золи/шлаку. Структура витратної частини процесу газифікації з наступним спалюванням генераторного газу з його охолодженням перед камерою згоряння представлена на рисунку 4.

У витратну частину балансу процесу згоряння генераторного газу при його попередньому охолодженні входить фізична ексергія теплоти, отримана при охолодженні генераторного газу до 120 °С, що становить 15,4 % від ексергії приходу. Зі збільшенням температури газифікації потенціал фізичної ексергії збільшується за рахунок різниці температури генераторного газу на виході з газифікатора та охолодженого генераторного газу до 120 °С перед камерою згоряння (збільшення температури газу на 100 °С призводить до збільшення фізичного потенціалу ексергії в середньому на 700 кДж/кг

вугілля), що призводить до зменшення необоротних втрат і, отже, до збільшення загального ККД процесу.

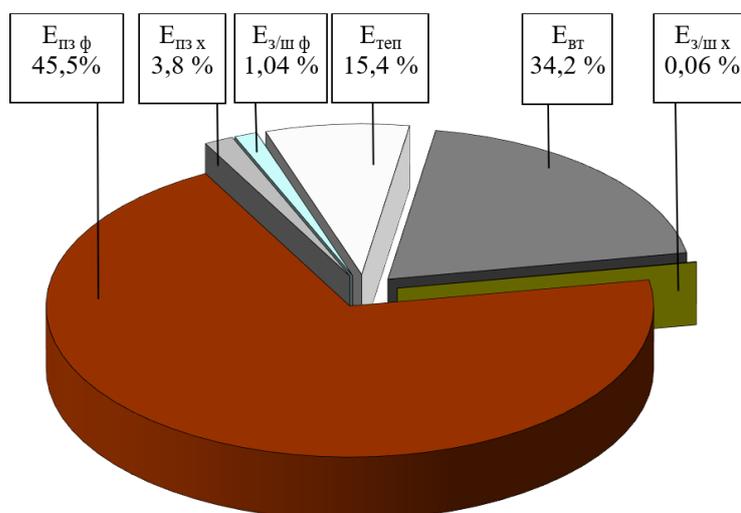


Рисунок 4 – Структура витратної частини процесу газифікації з наступним спалюванням генераторного газу з його попереднім охолодженням перед камерою згоряння

Встановлено, що значення ексергетичних ККД процесу газифікації вугілля з наступним згорянням генераторного газу з його охолодженням перед камерою згоряння, які становлять: $ККД_{заг} = 61,4-63,5\%$, $ККД_{хім} = 1-4\%$, $ККД_{фіз} = 59-62,5\%$.

Проведено порівняльний аналіз запропонованих схем двостадійної переробки вугілля. На рисунку 5 наведені отримані залежності ККД ексергетичної досконалості (загальної, по одержанню хімічної та фізичної ексергії) цих схем переробки з урахування складу та температури генераторного газу після газифікації.

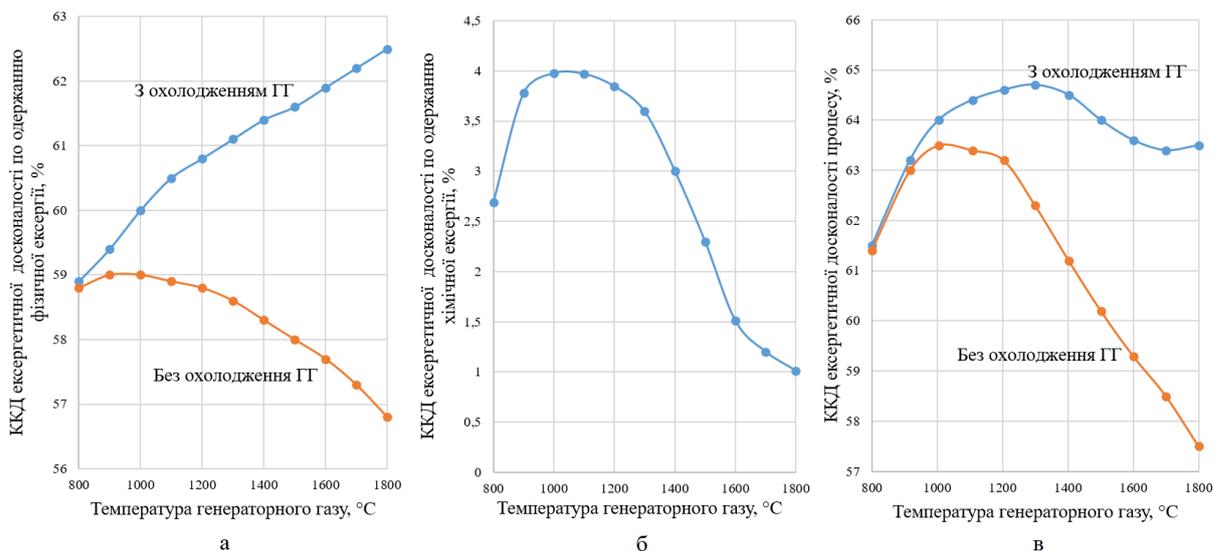


Рисунок 5 – ККД ексергетичної досконалості двостадійної схеми термічної переробки вугілля «газифікація - спалювання генераторного газу»:

- а) ККД по одержанню фізичної ексергії, б) ККД по одержанню хімічної ексергії,
- в) загального ККД

Аналіз отриманих залежностей показує суттєвий вплив початкової температури генераторного газу та умов його охолодження на ексергетичну ефективність процесу. Згідно з графіком (рис.5а), ексергетичний ККД, пов'язаний з одержанням фізичної ексергії, у разі охолодження генераторного газу монотонно зростає з підвищенням температури від 59,0 % до 62,5 %, тоді як без охолодження після досягнення максимуму на рівні приблизно 59,0 % при початковій температурі газу 900-1000 °С спостерігається поступове зниження до 57,0 % при 1800 °С. Це свідчить про суттєве зростання фізичних втрат при високих температурах за відсутності охолодження.

При згорянні генераторного газу відбувається перетворення продуктів реакції переважно у двоокиси вуглецю і водяної пари, тобто відбувається перетворення генераторного газу в продукти, непридатні для хімічного використання. ККД по одержанню хімічної ексергії не залежить від використання попереднього охолодження генераторного газу, тому що вплив термодинамічних факторів не впливає на хімічну ексергію та становить 1-4 % (рис. 5б)

При інтегральній оцінці встановлено наявність оптимуму ексергетичного ККД процесу газифікації без охолодження генераторного газу в області 1000-1100 °С, де ККД досягає максимального значення близько 63,0 %. Подальше підвищення температури до 1800 °С супроводжується зниженням ефективності до 57,0-58,0 % внаслідок зростання ексергетичних втрат. У разі застосування охолодження генераторного газу максимум ККД зміщується в область 1200-1300 °С і досягає близько 65,0 %, при цьому зниження ефективності при високих температурах є значно менш вираженим. Таким чином, охолодження забезпечує підвищення ексергетичного ККД на 1,5-2,0 % в зоні оптимуму та на 5,0-7,0 % більше при високих температурах. Охолодження генераторного газу дозволяє не лише підвищити рівень ексергетичної ефективності та використати фізичну ексергію генераторного газу для подальшого вироблення теплової енергії (пари, гарячої води), але й розширити діапазон вибору технології газифікації та параметрів отриманого генераторного газу.

Висновки. У роботі досліджено та виконано порівняльний аналіз двох схем двостадійного процесу термохімічної переробки вугілля, що включає повітряну газифікацію з подальшим спалюванням генераторного газу без попереднього охолодження та з його охолодженням перед камерою згорання до температури 120 °С. Залежно від способів (в щільному, киплячому шарі або в потоці) та режимів повітряної газифікації температура генераторного газу становить 800-1800 °С

Отримані результати показали, що ексергія надходження системи практично повністю формується хімічною ексергією вугілля (близько 99,9 %), яка трансформується переважно у фізичну ексергію продуктів згорання. Для схеми без охолодження генераторного газу встановлено високий рівень ексергетичних втрат (до 37,3 %), що обумовлено значною необоротністю процесу горіння, тоді як частка корисно використаної фізичної ексергії обмежується умовами її утилізації.

Попереднє охолодження генераторного газу забезпечує формування додаткового потоку фізичної ексергії теплоти (до 15,4 %), що призводить до зниження ексергетичних втрат (до 34,2 %) та підвищення загального ексергетичного ККД процесу.

Вперше встановлено наявність оптимуму загального ексергетичного ККД дво-стадійного процесу газифікації вугілля з подальшим спалюванням генераторного газу. Показано, що за відсутності охолодження генераторного газу максимальне значення ККД досягається при температурі генераторного газу 1000-1100 °С і становить близько 63,0 %, тоді як подальше підвищення температури призводить до його зниження. Встановлено, що застосування охолодження генераторного газу змінює характер залежності та зміщує оптимум початкової температури генераторного газу в область 1200-1300 °С з підвищенням ККД до 65,0 %.

Охолодження генераторного газу перед спалюванням забезпечує підвищення ексергетичного ККД на 1,5-2,0 % в зоні оптимуму та на 5,0-7,0 % більше при високих температурах. Отримані результати свідчать про визначальний вплив умов теплової обробки генераторного газу на положення оптимуму та рівень ексергетичної ефективності процесу.

Отримані результати можуть бути використані при оптимізації теплотехнічних схем енергетичних установок з метою зниження ексергетичних втрат та підвищення ефективності утилізації енергетичного потенціалу продуктів процесу.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Wu, H., Chen, X., Aziz, M., Huang, Z., & Zhang, Y. (2024). Exergy destruction analysis of coal gasification with O₂-H₂O combined with chemical kinetics. *Fuel*, 384, 134014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134014>
2. Ju, Y., & Lee, C. (2017). Evaluation of the energy efficiency of the shell coal gasification process by coal type. *Energy Conversion and Management*, 143, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.082>
3. Zheng, L., Jiang, X., Wang, S., He, J., Wang, Y., Hu, L., Xie, K., & Wang, P. (2025). Analysis of exergy flow and CCUS carbon reduction potential in coal gasification hydrogen production technology in China. *Energies*, 18(22), 5906. <https://doi.org/10.3390/en18225906>
4. Yu, S., Li, D., Zuo, Z., & Feng, M. (2025). Workflow design and operational analysis of a Coal-Based Multi-Energy combined supply system for electricity, heating, cooling, and gas. *Energy Science & Engineering*, 13(7), 3791–3805. <https://doi.org/10.1002/ese3.70137>
5. 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. *Heliyon*, 10(10), e30997. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30997>
6. Пінчук, В. О., Шарабура, Т. А., Чемеринський, М. С., & Пінчук, С. А. (2024). Ексергетичний аналіз процесів термічної переробки вугілля. *Енергетика теплотехнології та енергозбереження*, (4), 67–77. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.4.07>
7. Mishra, A., Gautam, S., & Sharma, T. (2018). Effect of operating parameters on coal gasification. *International Journal of Coal Science & Technology*, 5(2), 113–125. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0196-3>

8. Harris, D., & Roberts, D. G. (2023). Coal gasification and conversion. In *Elsevier eBooks* (pp. 665–691). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824327-5.00021-1>
9. Pribadi, G. a. D., & Noble, A. (2026). Gasification of Indonesia's Low-Rank coal: A Comparative review of technology options and contextual Considerations. *Fuel*, 414, 138280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.138280>
10. Dincer I., Rosen M. (2020). Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Third Edition. - Elsevier Science,– pp. 23-35, 37-60, 167-210, 479-514. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02067-3>
11. Kotas T.J. (2012). The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. - Paragon Publishing, 2012. – pp. 29-56, 99-161. ISBN 978-1908341891, eISBN 9781483100364
12. Seyitoglu, S., Dincer, I., & Kilicarslan, A. (2016). Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2592–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.228>

Received 26.03.2026
Accepted 27.03.2026
Published 31.03.2026

Exergy analysis of a two-stage coal thermochemical conversion process

Improving the efficiency of solid fuel utilization requires a reliable assessment of the thermodynamic performance of fuel conversion processes using an exergy-based approach. In contrast to conventional energy analysis, exergy analysis makes it possible to evaluate not only the amount of energy involved in a process, but also its quality and the degree of irreversibility accompanying energy conversion. In this study, a two-stage thermochemical conversion process of coal is considered, namely air gasification followed by combustion of the produced gas under two different process configurations: without preliminary cooling before combustion and with preliminary gas cooling. The study is focused on the exergy efficiency of these two configurations under different compositions and temperatures of the produced gas in the range of 800-1800 °C. For both process schemes, the overall exergy efficiency as well as the efficiencies associated with chemical and physical exergy were determined. The calculations made it possible to establish the temperature dependence of the exergy efficiency and to identify the operating conditions corresponding to the most favorable thermodynamic performance.

It was found that, in the case without preliminary cooling of the producer gas, the exergy efficiency reaches its maximum in the temperature range of 1000-1100 °C, where its value is about 63,0 %. When gas cooling is introduced before combustion, the maximum exergy efficiency shifts toward higher temperatures, namely 1200-1300 °C, and reaches about 65,0 %. This result indicates that the thermal state of the produced gas has a direct influence on the distribution of exergy within the system and on the overall thermodynamic effectiveness of the process. It is shown that preliminary cooling of the producer gas changes the structure of exergy flows due to the formation of an additional thermal potential that can be further utilized in associated thermal processes. Owing to this effect, the overall exergy efficiency increases by 1,5-7,0 %, depending on the initial temperature and composition of the gas. Thus, gas cooling should be considered not only as an auxiliary operation, but also as a factor affecting the thermodynamic performance of the whole two-stage conversion scheme. The obtained re-

sults may be used in the analysis and optimization of coal conversion systems, in particular for improving thermal process schemes and increasing the efficiency of utilizing the energy potential of gaseous products.

Keywords: coal gasification; producer gas; exergy analysis; exergy balance; thermodynamic efficiency; physical exergy; chemical exergy; exergy efficiency.

Тугова Олена Валеріївна - аспірант, Український державний університет науки і технологій.

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».

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

Tutova Olena Valeriyivna - postgraduate student, Ukrainian State University of Science and Technology.

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

Pinchuk Valeriia Oleksandrivna - doctor of engineering sciences, professor, head of the department of thermal engineering and energy technologies of the National Technical University "Dnipro Polytechnic".

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