

В. О. Пінчук, д. техн. н., професор, Т. А. Шарабура, к. техн. н., доцент,
М. С. Чемеринський, к. техн. н., доцент, С. А. Пінчук, аспірант

ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

Ключові слова: вугілля, повітряна газифікація, киснева газифікація, ексергетичний баланс, хімічна ексергія, фізична ексергія, ККД ексергетичної досконалості.

Вступ. Впровадження в Україні «зеленої» трансформації промисловості та енергетики шляхом скорочення споживання вугілля та іншого викопного палива, а також проведення реструктуризації вугільної галузі відбувається не так швидко, як передбачалося [1,2]. Така трансформація потребує часу, технологій та інвестицій для її здійснення, що не дає можливості швидкої відмови України від вугілля. Тому, враховуючи зростаючі потреби в створенні та впровадженні високоефективних безвідходних технологій, спрямованих на дотримання екологічних і ресурсозберігаючих норм, питання раціонального використання вугілля як енергоносія стають дуже актуальними.

Для розробки енергозберігаючих технологій і установок, що використовують вугілля, необхідна оцінка енергетичного потенціалу одержуваних продуктів. Крім того, необхідно визначити їх придатність для конкретних технологій, процесів і установок. Адже, поряд з утворенням цільових продуктів виходить значна кількість супутніх, які можуть бути ефективно використані для різних цілей, оскільки їх тепломісткість становить від 20 до 50% від теплоти згоряння вихідного вугілля залежно від способу переробки та характеристик вугілля. Одним із раціональних способів термічної переробки вугілля, окрім традиційного спалювання, є його газифікація [3,4].

Постановка задачі. Термодинамічні розрахунки та аналіз теплотехнічних установок звичайно обмежуються складанням і використанням енергетичних балансів, які виражають кількісні характеристики енергоресурсів, на основі яких визначаються такі величини як продуктивність установок, витрати енергоносіїв і т.п. Однак енергетичні баланси мають істотний недолік: вони не враховують якісних розходжень, енергетичну цінність енергоресурсів різної фізичної природи або різного потенціалу та не описують особливостей реальних робочих процесів у зв'язку із проявами необоротності, яка завжди знижує енергетичну ефективність реальних процесів. Тому метод розгляду процесів, що враховує не тільки кількісні, але і якісні особливості енергопотоків і енергоносіїв, істотно уточнює картину енерговикористання в різних установках. Таким методом є ексергетичний аналіз, а відповідні баланси – ексергетичними [5,6]. Складання й використання ексергетичних балансів теплотехнічних установок розширює рамки можливостей аналізу процесів, а важливим прикладним розділом ексергетичного аналізу є термодинамічно об'єктивна оцінка ступеню досконалості різних процесів і установок за допомогою ексергетичного ККД [7,8]. Всі застосування ексергетичного методу опираються на той факт, що для техніки, зокрема енергетики, важлива не енергія взагалі, а ексергія, тобто енергія, що має працездатність. Визначення раціональних шляхів її вироблення, використання, транспортування й збереження в будь-якій технології – це, в остаточному підсумку, ціль будь-якого інженерного аналізу й розрахунку [9,10].

Для ексергетичного аналізу необхідно розрахувати значення ексергії (хімічної та фізичної) на вході та на виході системи, побудувати матеріальні та ексергетичні баланси методів та схем термічної переробки та розрахувати ексергетичні ККД процесів (загальний, хімічний та фізичний) [10,11,12]. За допомогою запропонованих розрахунків можливе визначення раціональних режимів ведення процесу переробки залежно від кінцевих цілей отримуваних продуктів, порівняння ексергетичної досконалості процесів та виявлення найефективніших схем термічної переробки.

Основна частина. Досліджено процес газифікації довгополум'яного вугілля наступного складу: $W=13\%$; $A^p=28\%$; $S^p=3,5\%$; $C^p=75\%$; $H^p=5,5\%$; $N^p=1,6\%$; $O^p=13\%$; склад золи: $SiO_2=52,7\%$; $Al_2O_3=25,7\%$; $Fe_2O_3=14,1\%$; $Ca=2,0\%$; $Mg=0,9\%$; $K_2O=2,6\%$; $Na_2O=1,0\%$; $TiO_2=1,0\%$.

Дослідження ексергетичних характеристик процесу газифікації вугілля здійснювалося в широкому діапазоні температур, що охоплюють газифікацію в щільних, киплячих шарах і потоці при повітряному й кисневому дутті. Вихід і склад генераторного газу при повітряній та кисневій газифікації наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Вихід і склад генераторного газу при повітряній газифікації вугілля

Температура процесу, С	Витрата повітря, м ³ /кг	Склад генераторного газу, % об.							Вихід газу, м ³ /кг
		H ₂	H ₂ O	H ₂ S	N ₂	CO	CO ₂	Інші	
1000	1,8	15,4	3,2	0,2	50,4	27,1	3,5	0,2	2,9
1200	2,1	11,3	5,6	0,6	54,3	23,3	4,6	0,3	3,7
1400	2,5	7,6	7,9	0,4	58,3	19,4	6,0	0,4	3,1
1600	3,0	4,3	9,7	0,001	62,6	14,8	7,9	0,7	2,4
1800	3,7	1,9	10,5	0,003	66,8	9,4	10,7	0,7	1,6

Таблиця 2 – Вихід і склад генераторного газу при кисневій газифікації вугілля

Температура процесу, С	Витрата кисню, м ³ /кг	Склад генераторного газу, % об.							Вихід газу, м ³ /кг
		H ₂	H ₂ O	H ₂ S	N ₂	CO	CO ₂	Інші	
1000	0,29	36,9	0,4	0,8	0,4	60,7	0,4	0,4	1,44
1200	0,32	34,4	2,4	1,4	0,4	59,4	1,6	0,4	1,45
1400	0,35	32,1	4,8	1,3	0,4	58,4	2,6	0,4	1,44
1600	0,38	29,1	7,8	0,9	0,5	57,2	3,6	0,9	1,44
1800	0,41	26,1	10,9	0,6	0,5	55,9	4,8	1,2	1,46

Дослідженнями встановлено, що основними продуктами газифікації є генераторний газ і шлаки. Схема газифікації вугілля наведена на рис. 1.

Ексергетичний баланс процесу газифікації, кДж/кг вугілля:

$$E_{в\ x} + E_{в\ \phi} + E_{ок\ x} + E_{ок\ \phi} = E_{г\ x} + E_{г\ \phi} + E_{шл\ x} + E_{шл\ \phi} + \Delta E_{вт}, \quad (1)$$



де $E_{вх}$ – хімічна ексергія вугілля;
 $E_{вф}$ – фізична ексергія вугілля;
 $E_{окх}$ – хімічна ексергія окисника;
 $E_{окф}$ – фізична ексергія окисника;
 $E_{ггх}$ – хімічна ексергія генераторного газу;
 $E_{ггф}$ – фізична ексергія генераторного газу;
 $E_{шх}$ – хімічна ексергія шлаку;
 $E_{шф}$ – фізична ексергія шлаку;
 $\Delta E_{вт}$ – ексергетичні втрати.

Рисунок 1 – Схема газифікації вугілля

Відповідно до методики ексергетичного аналізу [10,11] складені ексергетичні баланси процесу газифікації вугілля при повітряному й кисневому дутті в діапазоні температур від 800 °С до 1800 °С. Приклад матеріального та ексергетичного балансу для газифікації вугілля при температурі 1200 °С наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Матеріальний та ексергетичний баланси процесу газифікації вугілля

Статті балансу	Кількість, кг		Ексергія			
			МДж/кг вугілля		%	
	повітряне дуття	кисневе дуття	повітряне дуття	кисневе дуття	повітряне дуття	кисневе дуття
Прихід						
Вугілля	1		20,35		99,999	
Окисник	2,75	0,5	0,0001		0,001	
Разом	3,75	1,5	20,35		100	
Витрата						
Шлаки	0,24	0,2	0,22		1,1	
Генераторний газ	3,51	1,3	15,06	14,25	74,0	70,0
Ексергетичні втрати	-		5,07	5,88	24,9	28,9
Разом	3,75	1,5	20,35		100	

За результатами дослідження встановлено, що при повітряній та кисневій газифікації ексергію приходу на 99,9 % становить хімічна ексергія вугілля, що перетворюється в ексергію генераторного газу та шлаку.

Структура витратної частини ексергетичного балансу процесу газифікації при повітряному й кисневому дутті представлена на рисунку 2.

Основними компонентами генераторного газу є горючі компоненти CO і H₂, що обумовлює його високу хімічну ексергію. У зв'язку із цим, генераторний газ можна використовувати як паливо, відновлювач, або як проміжну сировину для наступних перетворень. Вміст горючих компонентів генераторного газу при кисневій газифікації на

59 % більше, ніж при повітряній, але при цьому вихід газу при кисневій газифікації на 2,26 м³/кг вугілля менше, ніж при повітряній. Тому збільшення хімічної ексергії генераторного газу, що отримано шляхом кисневої газифікації, усього на 5 % більше, ніж при повітряній.

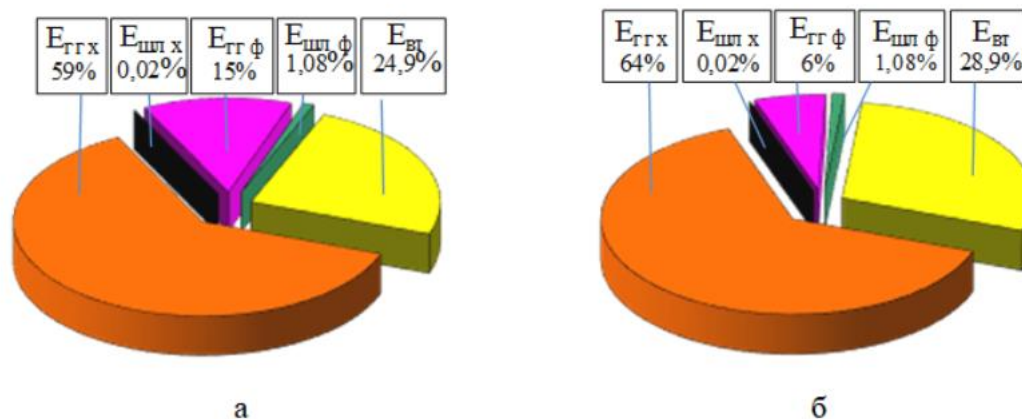


Рисунок 2 – Структура витратної частини ексергетичного балансу процесу повітряної (а) та кисневої (б) газифікації

Хімічні процеси в газогенераторі протікають при високих температурах, тому генераторний газ володіє значною фізичною ексергією, яку можливо використовувати для одержання теплової енергії. Фізична ексергія генераторного газу кисневої газифікації менше на 9% ніж для повітряної, що обумовлюється меншою кількістю генераторного газу при кисневій газифікації вугілля та зменшенням на 6% вмісту негорючих компонентів H_2O і CO_2 в цьому газі.

Хімічна ексергія шлаку незначна, але можливо її використання як сировини в подальших виробничих процесах. Хімічна і фізична ексергія шлаку, залежно від способу дуття, не змінюється, тому що не змінюється склад та вихід шлаків, і становить 1,1 % від витратної частини балансу процесу газифікації.

Втрати процесу, які складаються із втрат від необоротності процесу окислювання вугілля, втрат у навколишнє середовище, втрат у результаті віднесення вугільних часток і крапель шлаку, при кисневій газифікації на 4 % більше в порівнянні з повітряною газифікацією.

Досліджено вплив температури процесу і виду окислювача на ексергію продуктів газифікації вугілля, що представлено на рис. 3 на прикладі повітряної газифікації.

Визначено, що з підвищенням температури в реакторі вміст горючих компонентів генераторного газу CO і H_2 знижується, що призводить до зниження хімічної ексергії газу, яка в середньому складає 8,5 МДж/кг вугілля. Вміст негорючих компонентів H_2O і CO_2 навпроти збільшується, при цьому зростає температура процесу, а отже і фізична ексергія газу збільшується і в середньому складає 4,5 МДж/кг вугілля. Підвищення температури на 100 °С призводить до зменшення частки вмісту H_2 та CO в середньому на 4 % за об'ємом і призводить до зменшення хімічного потенціалу в середньому на 1 МДж/кг вугілля й одночасно до збільшення фізичного потенціалу також у середньому на 1 МДж/кг вугілля.

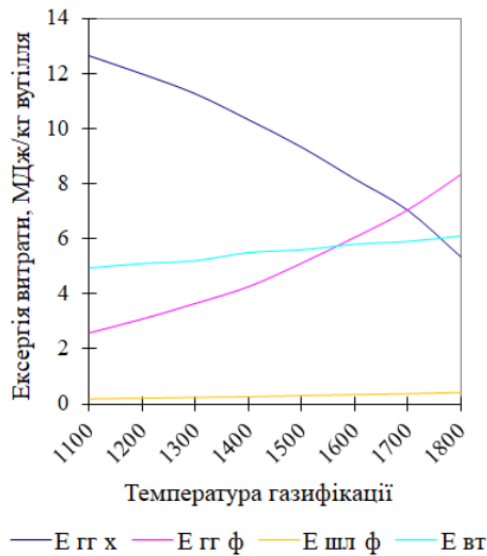


Рисунок 3 – Вплив температури процесу на ексергію продуктів газифікації

Фізична ексергія шлаку за рахунок підвищення температури процесу газифікації незначно зростає: підвищення температури на 100 °С підвищує фізичну ексергію шлаку у середньому на 31 кДж/кг вугілля. Хімічна ексергія шлаку не змінюється, оскільки не змінюється склад та вихід шлаків, і становить 5 кДж/кг вугілля. Зі збільшенням температури за рахунок реакцій горіння зростають втрати від необоротності процесу горіння.

Також досліджено вплив температури процесу і виду окислювача на ККД ексергетичної досконалості процесу газифікації вугілля. Результати досліджень, які визначено відповідно до методики ексергетичного аналізу [10,11], представлені на рис. 4.

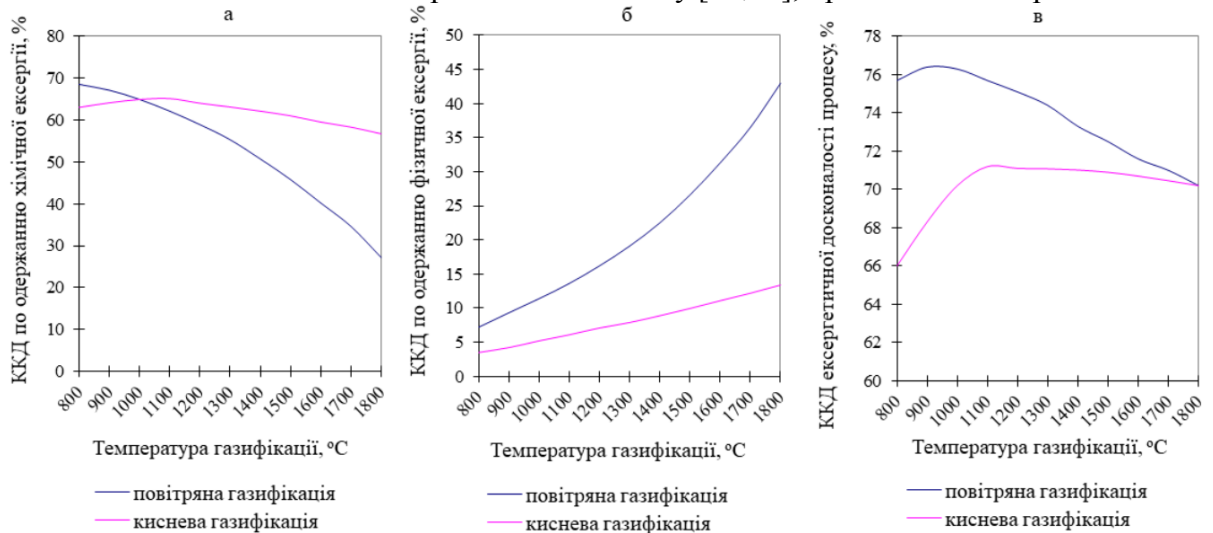


Рисунок 4 – Вплив температури процесу на ККД ексергетичної досконалості процесу газифікації вугілля: а) ККД по одержанню хімічної ексергії; б) ККД по одержанню фізичної ексергії; в) загального ККД

Як видно з отриманих результатів досліджень, при повітряній газифікації максимум ексергетичного ККД спостерігається при температурі 900 °С та становить 76,4 %, при цьому сумарна хімічна ексергія – 13,66 МДж/кг вугілля, а при кисневій газифікації максимальний ексергетичний ККД досягається при температурі 1100 °С і

складає 71,2 %, а сумарна хімічна ексергія становить 13,25 МДж/кг вугілля. Це пояснюється тим, що при цій температурі досягається максимальний вміст горючих компонентів генераторного газу, а отже і його максимальна хімічна ексергія. Оскільки при подальшому підвищенні температури в реакторі вміст горючих компонентів газу знижується, а негорючих – навпроти збільшується, то змінюються і значення хімічної та фізичної ексергії.

У випадку повітряної газифікації з підвищенням температури відбувається зменшення хімічної ексергії генераторного газу та значне збільшення його фізичної ексергії, при цьому загальний ККД зменшується незначно, оскільки зменшення хімічної ексергії супроводжується рівномірним збільшенням фізичної ексергії. У випадку кисневої газифікації подальше підвищення температури призводить до незначного зменшення ККД по одержанню хімічної ексергії внаслідок незначного зменшення вмісту CO та H₂ (підвищення температури на 100 °C призводить до зниження вмісту на 3,6 %). Зменшення хімічної ексергії супроводжується рівномірним збільшенням фізичної ексергії, що призводить до незначного зменшення загального ККД процесу (підвищення температури на 100 °C приводить до зниження ККД у середньому на 0,17 %).

З отриманих результатів видно, що при температурі 1000 °C графіки залежності впливу температури на ексергетичні ККД по одержанню хімічної ексергії кисневої та повітряної газифікації перетинаються в точці, значення ККД якої дорівнює 65 %.

В результаті досліджень ефективності повітряної та кисневої газифікації визначено, що з метою досягнення найвищої ефективності використання палива доцільно утилізувати теплоту одержуваного генераторного газу. Утилізація 1 МДж/кг вугілля фізичної ексергії газу призводить до збільшення загального ККД повітряної газифікації на 3,5 %, а загального ККД кисневої газифікації приблизно на 0,7 %.

В роботі також було проведено дослідження впливу методу термічної переробки вугілля на ексергетичну досконалість процесу. Зроблено порівняльний аналіз традиційного спалювання вугілля та процесу його газифікації при повітряному та кисневому дутті. Результати розрахунків ексергетичних балансів представлені на рис. 5–6, які відображають ексергетичну характеристику одержуваних продуктів і ексергетичну досконалість розглянутих методів термічної переробки.

За результатами дослідження визначено, що газифікація вугілля є більш раціональним методом його термічної переробки в порівнянні з традиційним спалюванням, оскільки найбільші втрати спостерігаються в процесі згоряння вугілля, ексергетичний ККД якого становить 64,8 %. При згорянні вугілля необоротні втрати процесу становлять 35 % його вихідної ексергії.

Генераторний газ можливо використовувати як паливо для енергетичних котлів побутових і промислових котелень, паливо для двигунів внутрішнього згоряння і газоподібних турбін, паливо для сушильних і теплообмінних апаратів різного призначення, тобто як альтернатива природного газу або рідких видів палива, таких як бензин, дизельне паливо, мазут і т.п.

У газових турбінах можливе використання низькокалорійного генераторного газу. При повітряній газифікації виробляється низькокалорійний генераторний газ із високою теплотворною здатністю 4–6 МДж/м³ і досить великим виходом газу. В такому разі для газових турбін більш ефективним режимом є повітряна газифікація при температурі 900–1100 °C, де досягається максимальна ексергетична досконалість процесу 75,7–76,3 %. Але отриманий при цих умовах генераторний газ не придатний для транспортування по трубопроводу через низький енергетичний потенціал. Газифікація з ви-

користанням кисню дає середньокалорійний газ із теплотворною здатністю 10–12 МДж/м³, який є придатним для транспортування по трубопроводу.

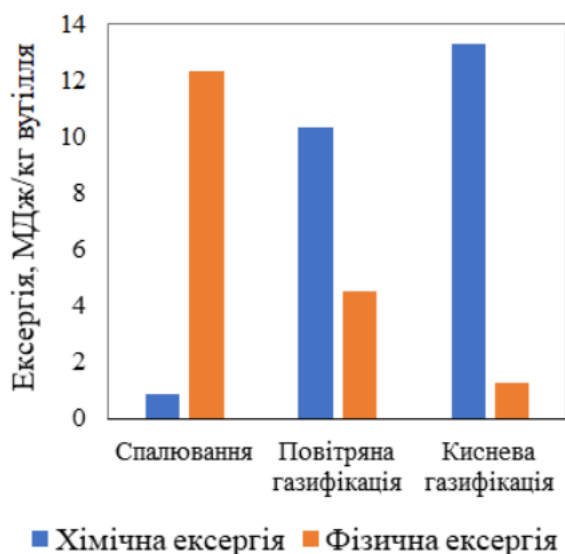


Рисунок 5 – Ексергетична характеристика одержуваних продуктів термічної переробки вугілля

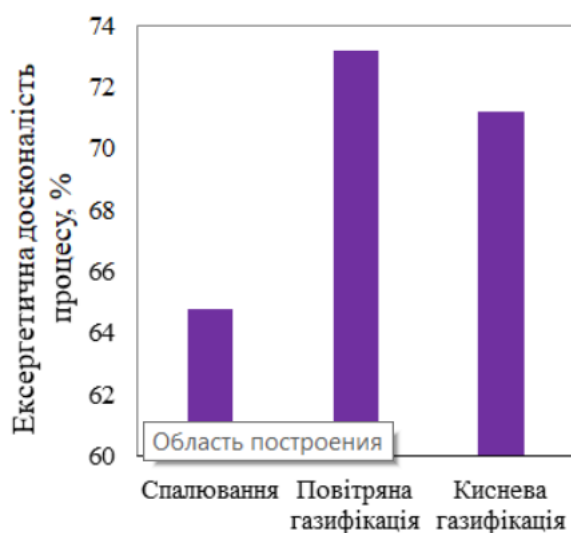


Рисунок 6 – Ексергетична досконалість методів термічної переробки вугілля

З метою одержання горючих газів більш ефективно застосовувати кисневу газифікацію при температурах вище 1200 °С, при цьому ККД по одержанню хімічної ексергії близький до максимального і становить 71,2 %.

Для доменних печей застосовують відновлювальний газ, вміст негорючих компонентів якого (H₂O+CO₂) повинне становити менше 5 %, тому для цих цілей більш раціональним методом є повітряна й киснева газифікація при температурі в реакторі 1100 °С, ексергетичний ККД якого дорівнює 76,3 %, хімічна ексергія генераторного газу становить 12,6 МДж/кг вугілля.

Таким чином, вибір раціональної температури ведення процесу газифікації вугілля при повітряному та кисневому дутті визначається кінцевими цілями використання генераторного газу.

Висновки. При термічній переробці вугілля виходять різноманітні види палива і сировини, які можливо використовувати в різних галузях промисловості. Для ефективного енерговикористання таких продуктів в різних установках необхідно проводити не лише енергетичний аналіз процесу, а і ексергетичний, який враховує не тільки кількісні, але і якісні особливості енергопотоків та енергоносіїв, що дає можливість оцінити ступінь досконалості різних процесів і установок. В роботі проведено дослідження впливу методу термічної переробки вугілля на ексергетичну досконалість процесу та визначено, що газифікація вугілля є більш раціональним методом його термічної переробки в порівнянні з традиційним спалюванням.

Досліджено вплив температури процесу і виду окислювача на ексергію продуктів газифікації і ККД ексергетичної досконалості процесу. Визначено, що при підвищенні температури в реакторі вміст горючих компонентів газу CO і H₂ знижується, що призводить до зниження хімічної ексергії генераторного газу, а отже і зменшення ККД по одержанню хімічної ексергії, а фізична ексергія генераторного газу при цьому збільшується, що впливає на ККД ексергетичної досконалості процесу газифікації.

Проведено порівняння ефективності повітряної та кисневої газифікації та вибрані раціональні температурні режими процесу в залежності від кінцевих цілей використання отриманих продуктів. Визначено перевагу високотемпературної кисневої та повітряної газифікації, яка характеризується низькими втратами ексергії (24,9–28,9 %) та високим хімічним потенціалом (12–13,46 МДж/кг вугілля). ККД ексергетичної досконалості процесу кисневої газифікації складає 68,3–71,2 %, а для повітряної – 70,2–76,3 %, що визвано великим виходом продуктів переробки.

Отримані дані дають підстави розглядати процес газифікації як раціональний метод переробки вугілля, особливо низькосортного вугілля та відходів збагачення, що досить простий у технічній реалізації на підприємствах і в енергетиці.

Література

1. Chepeliev M., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A. Can Ukraine go “green” on the post-war recovery path? // *Joule*. – 2023. – Vol 7. – P. 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.007>.
2. Україна та Європейський зелений курс. Річний моніторинговий звіт. – 2023. – 46 с. <https://dixigroup.org/analytic/ukrayina-ta-yevropejskyj-zelenyj-kurs-richnyj-monitoryngovyj-zvit-2023>.
3. Chyou YP., Chiu HM., Chen PC., Chien HY., Wang T. Coal-derived synthetic natural gas as an alternative energy carrier for application to produce power - comparison of integrated vs. non-integrated processes // *Energy*. – 2023. – Vol. 282. – P. 128958. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128958>.
4. Mishra A., Gautam S., Sharma T. Effect of operating parameters on coal gasification // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 113–125. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0196-3>.
5. Куделя П.П., Дубовський С.В. Енергетичний і ексергетичний підходи до проблеми раціонального використання енергії // *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. – 2020. – №2 (60). – С. 7–16. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54308>.
6. Volianska L. G., Pikul M. Energy and exergy efficiency analysis of combined heat and power plant // *Наукоємні технології*. – 2019. – №4 (44). – С. 468–475. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.44.14323>.

7. Фіалко Н.М., Степанова А.І., Навродська Р.О., Шевчук С.І. Ексергетична ефективність утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки // Теплофізика та теплоенергетика. – 2020. – Т. 42. – №3. – С. 56–60. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.6>.
8. Terzi R. Application of Exergy Analysis to Energy Systems / Application of Exergy, Chapter 6. – IntechOpen, 2018. – P. 109–123. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74433>.
9. Michaelides E. Exergy Analysis for Energy Conversion Systems. – Cambridge University Press, 2021. – 314 p. ISBN: 9781108480581.
10. Dincer I., Rosen M. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Third Edition. - Elsevier Science, 2020. – pp. 23–35, 37–60, 167–210, 479–514. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02067-3>.
11. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. – Paragon Publishing, 2012. – pp. 29–56, 99–161. ISBN 978-1908341891, eISBN 9781483100364.
12. Seyitoglu SS, Dincer I, Kilicarslan A. Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, Issue 4. – p. 2592–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.228>.

Bibliography (transliterated)

1. Chepeliev M., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A. Can Ukraine go “green” on the post-war recovery path? // Joule. – 2023. – Vol 7. – P. 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.007>.
2. Ukrayina ta Yevropeys'kyy zelenyy kurs. Richnyy monitorynhovyy zvit. – 2023. – 46 p. <https://dixigroup.org/analytic/ukrayina-ta-yevropejskyj-zelenyj-kurs-richnyj-monitoryngovyj-zvit-2023>.
3. Chyou YP., Chiu HM., Chen PC., Chien HY., Wang T. Coal-derived synthetic natural gas as an alternative energy carrier for application to produce power - comparison of integrated vs. non-integrated processes // Energy. – 2023. – Vol. 282. – P. 128958. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128958>.
4. Mishra A., Gautam S., Sharma T. Effect of operating parameters on coal gasification // International Journal of Coal Science and Technology. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 113–125. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0196-3>.
5. Kudelya P.P., Dubovs'kyi S.V. Enerhetychnyy i ekserhetychnyy pidkhody do problemy ratsional'noho vykorystannya enerhiyi // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal. – 2020. – №2 (60). – P. 7–16. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54308>.
6. Volianska L.G., Pikul M. Energy and exergy efficiency analysis of combined heat and power plant // Наукоємні технології. – 2019. – №4 (44). – С. 468–475. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.44.14323>.
7. Fialko N.M., Stepanova A.I., Navrods'ka R.O., Shevchuk S.I. Ekserhetychna efektyvnist' utylizatora teploty vidkhidnykh haziv teplovoho dvyhuna koheneratsiynoyi ustanovky // Теплофізика та теплоенергетика. – 2020. – Т. 42. – №3. – P. 56–60. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.6>.
8. Terzi R. Application of Exergy Analysis to Energy Systems / Application of Exergy, Chapter 6. – IntechOpen, 2018. – P. 109–123. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74433>.

9. Michaelides E. Exergy Analysis for Energy Conversion Systems. – Cambridge University Press, 2021. – 314 p. ISBN: 9781108480581.

10. Dincer I., Rosen M. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Third Edition. - Elsevier Science, 2020. – pp. 23–35, 37–60, 167–210, 479–514. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02067-3>.

11. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. – Paragon Publishing, 2012. – pp. 29–56, 99–161. ISBN 978-1908341891, eISBN 9781483100364.

12. Seyitoglu SS, Dincer I, Kilicarslan A. Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, Issue 4. – p. 2592–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.228>.

УДК 621.1.016.7

В. О. Пінчук, д. техн. н., професор, Т. А. Шарабура, к. техн. н., доцент,
М. С. Чемеринський, к. техн. н., доцент, С. А. Пінчук, аспірант

ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ

Для розробки енергозберігаючих технологій і установок, що використовують вугілля, необхідна оцінка енергетичного потенціалу одержуваних продуктів. Крім того, необхідно визначити їх придатність для конкретних технологій, процесів і установок. Запропоновано крім енергетичного методу використовувати ексергетичний метод, що дозволяє оцінити не тільки кількісну, але і якісну сторону процесів термічної переробки. Для енергетики та промисловості становлять інтерес такі термічні методи переробки, як спалювання та газифікація.

В роботі виконано розрахунки ексергетичної досконалості продуктів термічної переробки вугілля, за результатами яких складені матеріальні та ексергетичні баланси процесу газифікації при повітряному й кисневому дутті та процесу спалювання, проведено аналіз впливу температури процесів на характеристики продуктів термічної переробки вугілля (склад, вихід, ексергія), а також розраховані ККД ексергетичної досконалості (загальної, по одержанню хімічної та фізичної ексергії) цих методів термічної переробки.

На основі аналізу визначені раціональні режими ведення процесів термічної переробки залежно від кінцевих цілей одержаних продуктів. Визначено перевагу високо-температурної кисневої та повітряної газифікації, яка характеризується низькими втратами ексергії (24,9–28,9 %) та високим хімічним потенціалом (12–13,46 МДж/кг вугілля). ККД ексергетичної досконалості процесу кисневої газифікації складає 68,3–71,2 %, а для повітряної – 70,2–76,3 %. Також визначено, що з метою досягнення найвищої ефективності використання палива доцільно утилізувати теплоту одержуваного генераторного газу. Утилізація 1 МДж/кг вугілля фізичної ексергії газу призводить до збільшення загального ККД повітряної газифікації на 3,5 %, а загального ККД кисневої газифікації приблизно на 0,7 %.

Проведено порівняння ексергетичної досконалості процесів, на основі чого виявлено, що газифікація вугілля є більш раціональним методом його термічної переробки в порівнянні з традиційним спалюванням, оскільки найбільші втрати спостерігаються в процесі згоряння вугілля, ексергетичний ККД якого становить 64,8 %. При згоранні вугілля необоротні втрати процесу становлять 35 % його вихідної ексергії.

Ключові слова: вугілля, повітряна газифікація, киснева газифікація, ексергетичний баланс, хімічна ексергія, фізична ексергія, ККД ексергетичної досконалості.

V. O. Pinchuk, T. A. Sharabura, M. S. Chemerynskyi, S. A. Pinchuk

EXERGY ANALYSIS OF COAL THERMAL CONVERSION PROCESSES

To develop energy-saving technologies and facilities that use coal, it is essential to evaluate the energy potential of the resulting products. Additionally, it is necessary to determine their suitability for specific technologies, processes, and installations. Alongside the energy method, it is proposed to use the exergy method, which allows for the assessment of not only the quantitative but also the qualitative aspects of thermal conversion processes. Thermal conversion methods such as combustion and gasification are of interest for both energy and industrial applications.

The study includes calculations of the exergy efficiency of coal thermal conversion products, based on which material and exergy balances were compiled for the gasification process under air and oxygen blast conditions, as well as for the combustion process. An analysis was conducted to evaluate the impact of process temperatures on the characteristics of coal thermal conversion products (composition, output, exergy). Additionally, the exergy efficiency coefficients (overall, chemical and physical exergy) for these thermal conversion methods were calculated.

Based on the analysis, optimal operating modes for coal thermal conversion processes were determined, depending on the final goals of the obtained products. The advantages of high-temperature oxygen and air gasification were identified, characterized by low exergy losses (24.9–28.9 %) and high chemical potential (12–13.46 MJ/kg of coal). The exergy efficiency of the oxygen gasification process is 68.3–71.2 %, while for air gasification, it is 70.2–76.3 %. It was also established that, to achieve the highest fuel utilization efficiency, it is advisable to utilize the heat of the produced syngas. The utilization of 1 MJ/kg of coal from the physical exergy of the gas increases the overall exergy efficiency of air gasification by 3.5 % and that of oxygen gasification by approximately 0.7 %.

A comparison of the exergy efficiency of the processes was conducted, revealing that coal gasification is a more rational method of thermal conversion compared to traditional combustion. This is because the highest losses are observed during the combustion process, with an exergy efficiency of 64.8 %. During coal combustion, irreversible losses account for 35 % of its initial exergy.

Keywords: coal, air gasification, oxygen gasification, exergy balance, chemical exergy, physical exergy, exergy efficiency.