

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ ШЛЯХОМ ГАЗИФІКАЦІЇ

V. Pinchuk¹, <https://orcid.org/0000-0001-7684-1867>

M. Chemerynskyi¹ <https://orcid.org/0000-0002-0767-7028>

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

INCREASING THE EFFICIENCY OF WASTE DISPOSAL COAL ENRICHMENT THROUGH GASIFICATION

Мета. Визначення режимних параметрів газифікації відходів вуглезбагачення з урахуванням впливу складу та кількості окисника на характеристики генераторного газу.

Методика. Дослідження процесу газифікації відходів вуглезбагачення проводилось із застосуванням багатофункціонального програмного забезпечення для моделювання термохімічних процесів. Використання цього програмного комплексу дозволило визначати концентрації компонентів газу, розраховувати теплові та хімічні параметри системи та оцінити вплив змінних режимних факторів, таких як склад і витрата окисника, на склад генераторного газу та продуктивність газифікації.

Результати. Результати дослідження показали, що процес газифікації відходів вуглезбагачення істотно обумовлений параметрами окисника. Виявлено, що максимальна концентрація CO досягається при коефіцієнті витрати окисника 0,27–0,3, а підвищення витрати зменшує відновлювальні та збільшує окисні компоненти. Визначено, що H₂ зменшується, а H₂O збільшується зі зростанням витрати окисника. Крім того, показано, що для підтримання температури 1873–1973 К необхідне збагачення повітря киснем $\geq 35\%$, що забезпечує 80% відновлювальних і 14% окисних компонентів.

Наукова новизна. Встановлено вплив складу та витрати окисника на ефективність газифікації відходів вуглезбагачення, зокрема промпродукту та шламу, а також визначено оптимальні температурні режими для досягнення максимального вмісту відновлювальних компонентів у генераторному газі. Виявлено, що підвищення концентрації кисню в окиснику дозволяє значно збільшити частку відновлювальних компонентів при одночасному контролі окисних. Показано, що отримані результати можуть слугувати науково обґрунтованою основою для оптимізації технології високотемпературної газифікації відходів вуглезбагачення.

Практична значимість. Отримані режимні характеристики газифікації можуть бути використані під час проектування та модернізації енергетичних установок, призначених для утилізації вуглевмісних відходів на збагачувальних фабриках. Визначені параметри складу та витрати окисника дають змогу забезпечити стабільний тепловий режим і формування генераторного газу з прогнозованими властивостями, що важливо для створення автономних систем енергопостачання. Застосування цих результатів сприяє підвищенню енергоефективності виробництва, зменшенню залежності від зовнішніх енергоресурсів і одночасному зниженню екологічного навантаження на території промислових підприємств.

Ключові слова: газифікація, відходи вуглезбагачення, генераторний газ, окисник.

Вступ. У сучасних умовах функціонування вуглезбагачувальних фабрик проблема накопичення та утилізації вуглевмісних відходів набуває все більшої актуальності. Технологічні процеси збагачення характеризуються низкою обмежень і технічних недоліків, зокрема нестабільністю режимів, високим ступенем зношеності обладнання, зміною характеристик вихідної сировини та недостатнім рівнем автоматизації. Сукупність цих факторів призводить до переходу істотної частини органічної маси у промпродукт і шлам, які накопичуються у значних об'ємах і формують техногенні відвали [1, 2].

Відходи вуглезбагачення становлять комплексну екологічну проблему. Тривале їх зберігання супроводжується деградацією ґрунтів, забрудненням поверхневих і підземних вод, утворенням пилових викидів та підвищенням ризиків самозаймання, що формує додаткові небезпеки для навколишнього природного середовища. Особливої уваги потребують шлами, які здатні до акумуляції важких металів та токсикантів, що ускладнює їх безпечну утилізацію традиційними методами.

Попри зазначені ризики, вуглевмісні відходи можуть розглядатися як перспективний вторинний енергоресурс. Більшість промпродуктів та шламів має значну частку залишкового вуглецю, що робить їх придатними для подальшої термічної переробки без подальших витрат на глибоку підготовку сировини.

Серед доступних методів термічного перетворення (спалювання, піроліз, термообробка) особливе місце посідає газифікація – процес, що забезпечує глибоке перетворення органічної маси з утворенням генераторного газу. Газифікація дозволяє не лише зменшити обсяги накопичених відходів, але й отримати продукт із високим енергетичним потенціалом, придатний як паливо або сировина для синтезу. Таким чином, газифікаційні технології викликають інтерес з позицій енергоефективності, екологічної безпеки, а також раціонального використання ресурсної бази вугільної промисловості [3, 4].

Відомо, що ефективність газифікації відходів значною мірою визначається режимними параметрами процесу [5, 6]. Температурний рівень, склад окисника, його витрата, а також співвідношення газофазних і твердофазних компонентів визначають тепловий баланс реакторної системи, хід основних хімічних реакцій та формування складу генераторного газу. Невідповідність цих параметрів може суттєво знижувати теплотехнічні показники процесу, погіршувати якість газу та призводити до неповного перетворення вуглецевмісної складової [7].

У зв'язку з цим, **мета роботи** полягає у дослідженні режимних умов термохімічного перетворення вуглевмісних відходів з метою визначення параметрів, що забезпечують найвищу ефективність газифікаційного процесу та сприяють формуванню генераторного газу належної якості. При цьому провідне значення є визначення ролі складу та витрати окисника, оскільки саме ці чинники виступають основними регуляторами балансу між відновлювальними та окисними складовими газового середовища, що визначає результативність газифікації.

Основна частина. Для дослідження процесу газифікації використовувались вуглевмісні відходи збагачення, зокрема промпродукт та шлам, що утворюються під час переробки довгополуменевого газового вугілля. Основні характеристики цих матеріалів, наведено у таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Характеристика відходів, %

Тип відходів	Хімічний склад на суху беззолну масу					Зола (А)	Волога (W)
	С	Н	N	S	O		
Промпродукт	76,0	5,8	1,2	6,0	11,0	32,0	10,9
Шлам	74,0	5,0	2,0	7,0	12,0	40,8	15,1

Таблиця 2

Хімічний склад золи відходів, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
48	28,2	12,8	3,5	1,6	4,5	0,8	0,8

Дослідження термічних процесів переробки здійснено із застосуванням відомих термодинамічних моделей, побудованих на принципі максимізації ентропії для системи, що перебуває у гранично рівноважному стані. Такий підхід дає можливість визначити рівноважні концентрації компонентів та розрахувати ключові параметри багатокомпонентної гетерогенної системи.

Дослідження процесу газифікації проводилися за умов атмосферного тиску. В ролі окисника застосовувалися повітря, кисень та повітря, збагачене киснем, при цьому коефіцієнт витрати окисника змінювався в межах 0,2-0,5.

Дослідження процесу газифікації промпродукту. На рисунку 1 представлено температурний рівень процесу газифікації промпродукту.

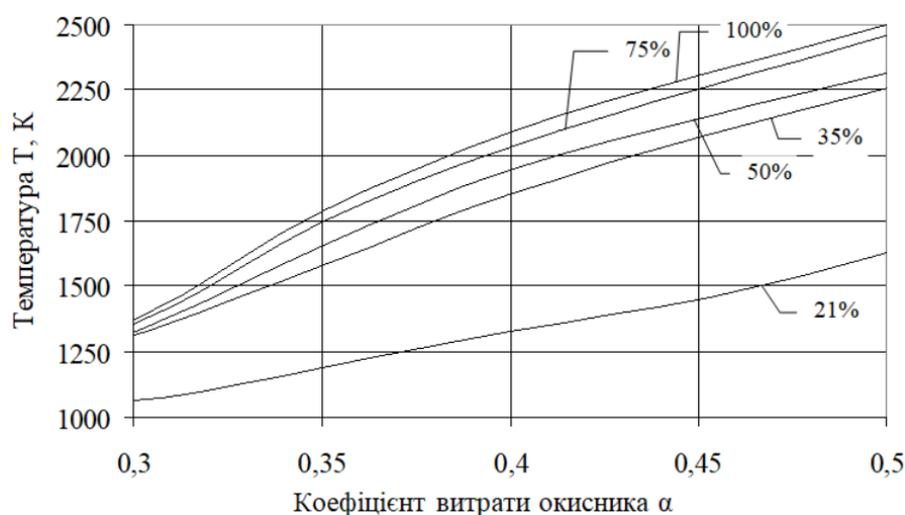


Рис. 1. Температурний рівень процесу газифікації промпродукту

Як видно з рисунку 1, при повітряній газифікації з ростом коефіцієнта витрати окисника збільшується температура, яка в середньому не перевищує 1620 К, при кисневій газифікації до коефіцієнта витрати окисника 0,32 температура не перевищує 1650 К, подальше збільшення коефіцієнта витрати окисника призводить до збільшення температури до 2500 К, однак при цьому якість газу погіршується.

Для палива з високим вмістом мінеральних домішок кращим є автотермічний високотемпературний процес газифікації, де в реакторі газифікації необхідно підтримувати температуру 1873–1973 К.

При повітряній газифікації такий температурний рівень неможливий. Одним із способів збільшення температури повітряної газифікації є збагачення повітря киснем. При збагаченні повітря киснем до 50%, необхідний рівень температур досягається при коефіцієнті витрати окисника 0,39, а при 75% вмісті кисню в повітрі – при коефіцієнті витрати окисника 0,37.

Для забезпечення підтримки температури газифікації в реакторі на рівні 1873-1973 К під час кисневої газифікації промпродукту необхідно застосовувати коефіцієнт витрати окисника, що дорівнює 0,36.

Основні компоненти генераторного газу при газифікації промпродукту представлені у вигляді графічних залежностей на рисунках 2–5.

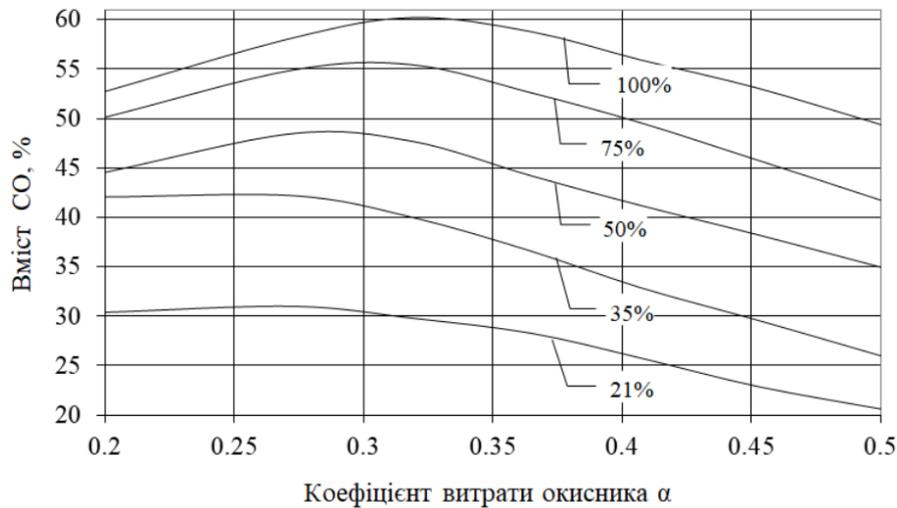


Рис. 2. Залежність вмісту CO від коефіцієнта витрати окисника при газифікації промпродукту

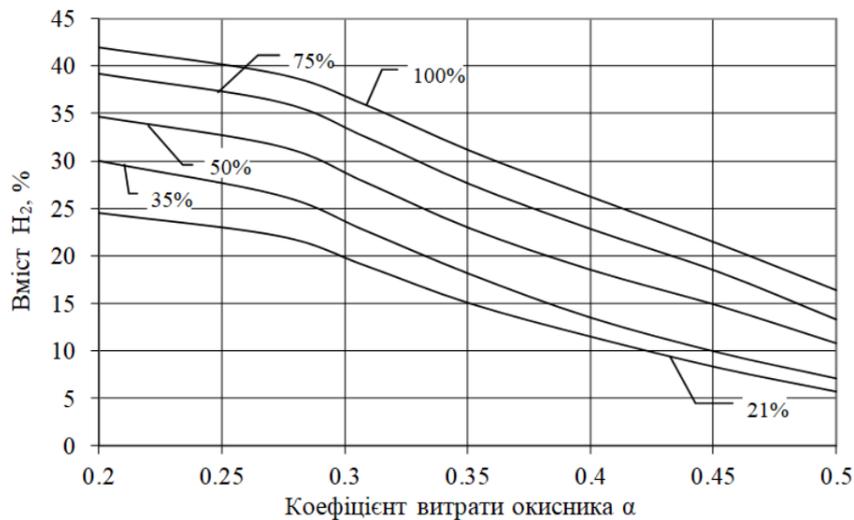


Рис. 3. Залежність вмісту H₂ від коефіцієнта витрати окисника при газифікації промпродукту

Як видно з рисунку 2 існує максимальний вміст CO в газі при певному значенні коефіцієнта витрати окисника, так наприклад:

– при повітряній газифікації максимальний вміст CO рівне 31% і спостерігається при коефіцієнті витрати окисника 0,26;

– при кисневій газифікації максимальний вміст CO рівне 60%, спостерігається при коефіцієнті витрати окисника 0,32. При цьому протікає реакція $C + 0,5O_2 = CO$.

При зменшенні коефіцієнта витрати окисника, щодо максимуму, відбувається зменшення вмісту CO в газі, пов'язаного з недоліком окисника (про що свідчить кількість вуглецю, що не прореагував, в кількості від 5–20%).

При збільшенні коефіцієнта витрати окисника, щодо максимуму, вміст CO зменшується, тобто CO₂ в газі збільшується (рис. 4) і відбувається реакція $CO + O_2 = CO_2$.

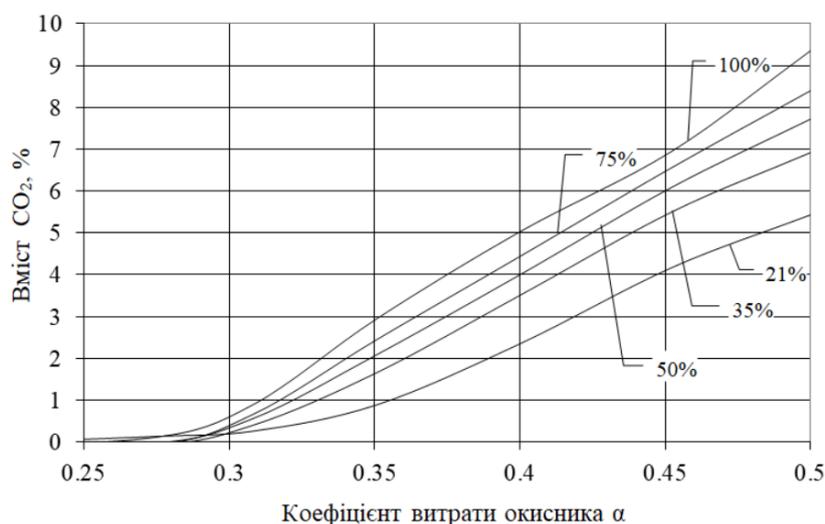


Рис. 4. Залежність вмісту CO₂ від коефіцієнта витрати окисника при газифікації промпродукту

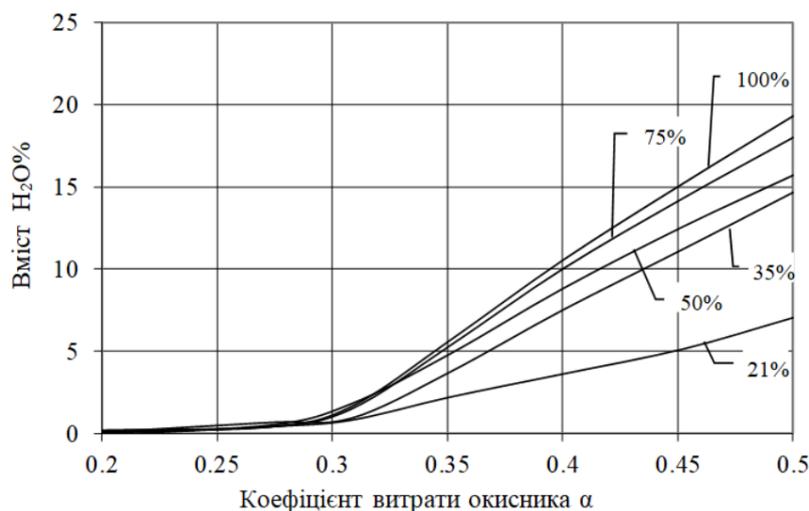


Рис. 5. Залежність вмісту H₂O від коефіцієнта витрати окисника при газифікації промпродукту

При цьому вміст CO_2 (див. рис. 4) для повітряної газифікації змінюється від 0,1% до 5,5%, а для кисневої газифікації від 0,1% до 17,5% в залежності від коефіцієнта витрати окисника.

Вміст H_2 в газі визначається наявністю водню і вологи у вихідному паливі і зі збільшенням коефіцієнта витрати окисника, вміст H_2 зменшується (див. рис. 3) і становить: максимальний вміст при повітряній газифікації дорівнює 24,5%, максимальний вміст при кисневій газифікації дорівнює 43%.

При збільшенні коефіцієнта витрати окисника вміст H_2O збільшується (див. рис. 5), це пов'язано з тим, що частка окисних компонентів збільшується, а вміст відновлювальних компонентів зменшується.

При повітряній газифікації співвідношення $\text{CO}/\text{H}_2 = 1,8$, а теплота згоряння в середньому складає $5,2 \text{ МДж/м}^3$, а при кисневій газифікації співвідношення $\text{CO}/\text{H}_2 = 2$, теплота згоряння в середньому становить $10,5 \text{ МДж/м}^3$. При переході від повітряного дуття до кисневого, зростання теплоти згоряння становить $5,3 \text{ МДж/м}^3$.

Таким чином, при кисневій газифікації необхідний температурний рівень досягається при коефіцієнті витрати окисника 0,36. При цьому частка відновлювальних компонентів становить 87%, а окисних 9,9%.

При повітряній газифікації здійснення необхідних температурних режимів можливо при збагаченні повітря киснем:

- повітря збагачене киснем до 35% – коефіцієнт витрати окисника становить 0,41. При цьому частка відновлювальних компонентів генераторного газу ($\text{CO} + \text{H}_2$) становить 47,6%, а окисних ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) – 10,6%;
- повітря збагачене киснем до 50% – коефіцієнт витрати окисника становить 0,9. При цьому частка відновлювальних компонентів генераторного газу ($\text{CO} + \text{H}_2$) становить 6%, а окисних ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) – 11,6%;
- повітря збагачене киснем до 75% – коефіцієнт витрати окисника становить 0,37. При цьому частка відновлювальних компонентів генераторного газу ($\text{CO} + \text{H}_2$) становить 79%, а окисних ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) – 10,7%.

Дослідження процесу газифікації шламу. На рисунку 6 представлено температурний режим процесу газифікації шламу.

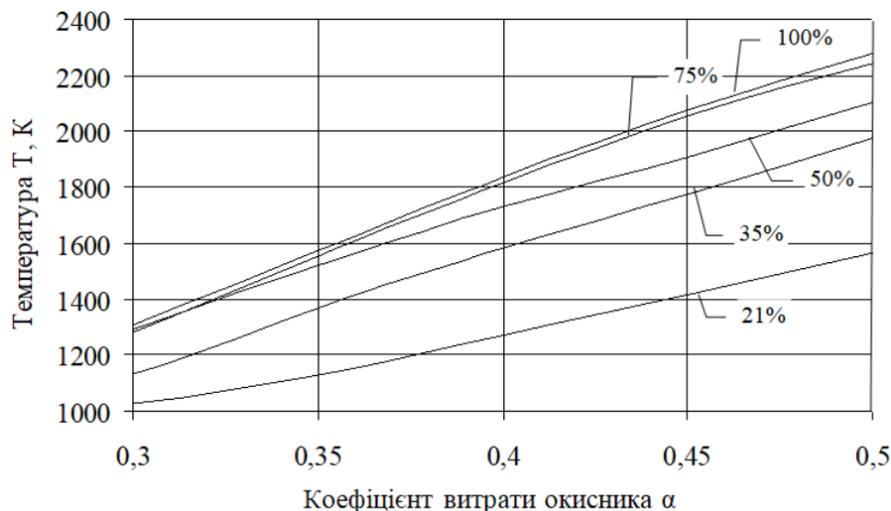


Рис. 6. Температурний рівень процесу газифікації шламу

Як видно з отриманих даних, температурний рівень процесу повітряної газифікації не перевищує 1590 К, а при кисневій газифікації температурний рівень на 13% нижче, ніж при газифікації промпродукту. При кисневій газифікації необхідний температурний рівень досягається при коефіцієнті витрати окисника 0,4.

При повітряній газифікації неможливо досягти необхідного температурного рівня, тому необхідно збагатити повітря киснем, наприклад, повітря збагачене киснем до 35% – необхідний температурний рівень досягається при коефіцієнті витрати окисника 0,46, а при 50% необхідний температурний рівень досягається при коефіцієнті витрати окисника 0,43, при 75% – при коефіцієнті витрати окисника 0,41.

Вміст компонентів генераторного газу, отриманого при газифікації шламу, представлені у вигляді графічних залежностей на рисунках 7–10.

Максимальний вміст CO (рис. 7) в газі спостерігається при кисневій газифікації при коефіцієнті витрати окисника 0,27, який становить 53%, а при повітряній газифікації при коефіцієнті витрати окисника 0,26 вміст CO становить 29%.

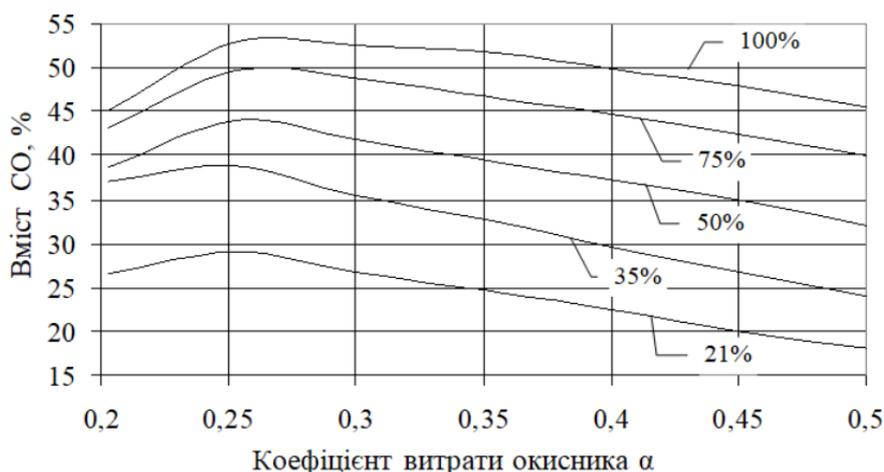


Рис. 7. Залежність вмісту CO від коефіцієнта витрати окисника при газифікації шламу

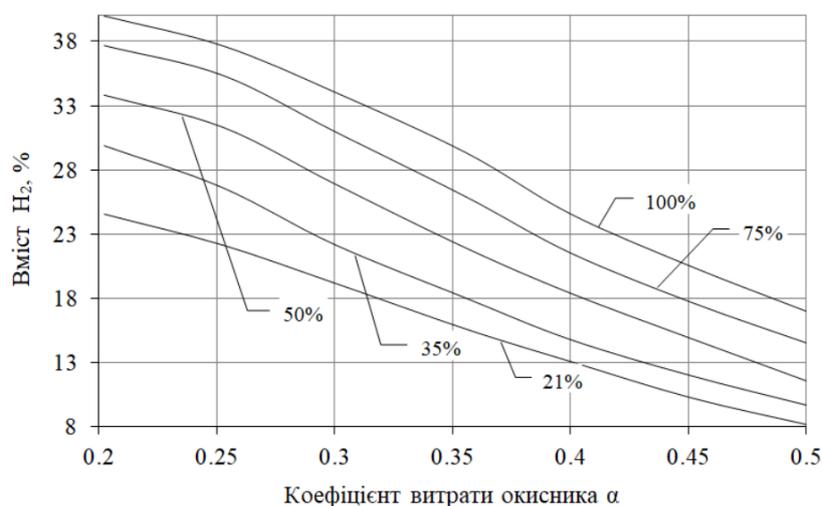


Рис. 8. Залежність вмісту H₂ від коефіцієнта витрати окисника при газифікації шламу

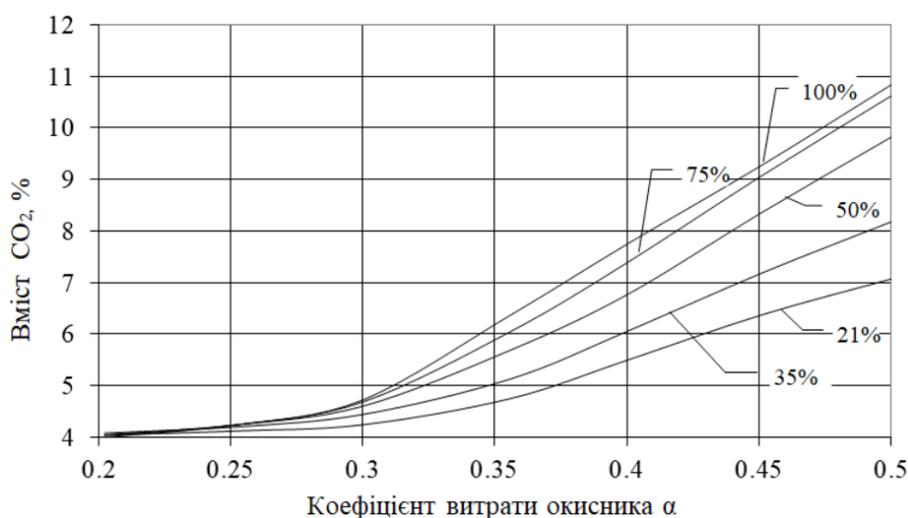


Рис. 9. Залежність вмісту CO₂ від коефіцієнта витрати окисника при газифікації шламу

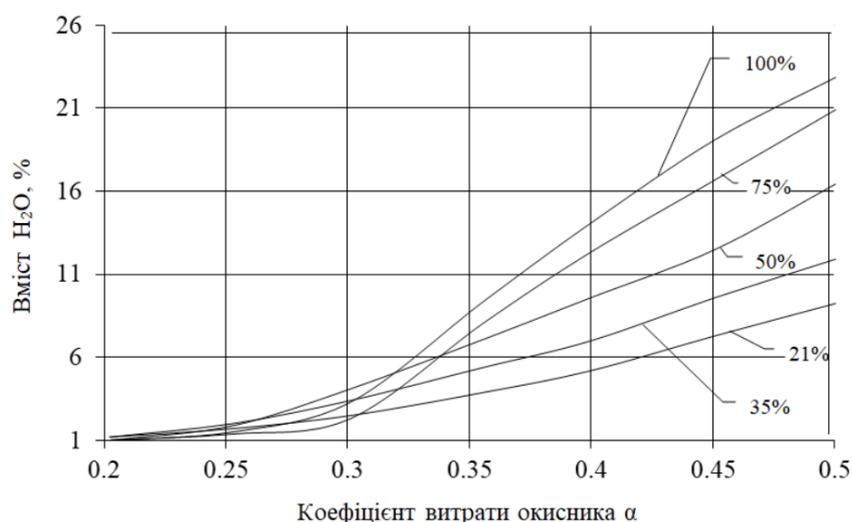


Рис. 10. Залежність вмісту H₂O від коефіцієнта витрати окисника при газифікації шламу

Вміст CO₂ змінюється в залежності від коефіцієнта витрати окисника: для повітряної газифікації 4–7%, а для кисневої газифікації 4–11,8%.

При повітряній газифікації співвідношення CO/H₂ = 1,8, а теплота згоряння в середньому становить 4,4 МДж/м³, а при кисневій газифікації CO/H₂ = 2, а теплота згоряння в середньому становить 9,1 МДж/м³. Зростання теплоти згоряння при переході від повітряного дуття до кисневого становить 4,5 МДж/м³.

Необхідний температурний рівень процесу при повітряній газифікації можливо отримати при збагаченні повітря киснем. Так, наприклад, при збагаченні повітря киснем до 75% коефіцієнт витрати окисника становить 0,41, при цьому частка відновлювальних компонентів газу становить (CO + H₂) – 65,7%, а окисних компонентів (CO₂ + H₂O) становить 19%.

При кисневій газифікації необхідний температурний рівень забезпечується при коефіцієнті витрати окисника 0,4, тоді частка відновлювальних компонентів становить 75,5%, а кількість окисних компонентів становить 21,8%.

Висновки. Отримані результати досліджень свідчать, що процес газифікації відходів вуглезбагачення істотно обумовлений параметрами окисника, зокрема його складом та витратою. Максимальна концентрація CO у генераторному газі спостерігається при коефіцієнті витрати окисника 0,27–0,3, при цьому зменшення цього показника веде до зниження вмісту CO, а збільшення – до скорочення відновлювальних компонентів і одночасного зростання окисних.

Вміст H₂ у газі визначається наявним воднем і вологою у вугіллі і при збільшенні витрати окисника знижується, тоді як концентрація H₂O підвищується.

Для підтримання середньої температури реактора близько 1973 К встановлено, що використання лише повітря не дозволяє досягти потрібного режиму, оскільки максимальна температура становить приблизно 1600 К, і в цьому випадку частка відновлювальних компонентів (CO + H₂) обмежується 37%, а окисних (CO₂ + H₂O) – 8,7%. Газифікація у температурному діапазоні 1873–1973 К стає можливою лише при збагаченні повітря киснем на рівні 35% або більше. У разі кисневої газифікації коефіцієнт витрати окисника варіюється від 0,36 до 0,4 залежно від виду відходів, що забезпечує середню частку відновлювальних компонентів (CO + H₂) близько 80%, а окисних (CO₂ + H₂O) – 14%.

Газифікація вуглевмісних відходів є ефективним методом не лише для утилізації сировини, а й для зменшення екологічного навантаження від техногенних відвалів. Раціональне керування складом та витратою окисника забезпечує оптимальні температурні умови та баланс відновлювальних і окисних компонентів генераторного газу, що впливає на його якість. Такий підхід дозволяє одночасно реалізувати енергетичний потенціал відходів і мінімізувати ризики для довкілля, перетворюючи їх на цінний вторинний ресурс.

Перелік посилань

1. Ivanov, Y. A., & Kovalchuk, I. P. (2024). Accumulation of mining wastes in the Iviv-volyn coal basin: current conditions, problems and perspectives of management. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 7, 75–84. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.8>
2. Kocheshkova, I. (2019). Coal cleaning wastes as the source of profit for urban places of old industrial mining regions. *Economic Herald of the Donbas*, 1(55), 49–56. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2019-1\(55\)-49-56](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2019-1(55)-49-56)
3. Saik, P., Lozynskyi, V., Falshtynskyi, V., Demydov, M., Hanushevych, K. (2019). Research into heat and mass indicators of coal gasification process. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 57, 32–44. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/57.032>
4. 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>
5. Лис, С.С., Юрасова, О.Г., & Коваленко, Т.П. (2021). Розроблення способу газифікації подрібненого вугілля. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(1), 89–92. <https://doi.org/10.36930/40310115>
6. Shahabuddin, M., & Alam, T. (2022). Gasification of solid Fuels (Coal, biomass and MSW): Overview, challenges and mitigation Strategies. *Energies*, 15(12), 4444. <https://doi.org/10.3390/en15124444>
7. Rahim, M. R., Trisasonko, A. P., Wahid, M. A., Othman, N., Araibi, A. S., & Said, M. (2024). Gasification technology and its future: a review. *Asean Engineering Journal*, 14(1), 45–61. <https://doi.org/10.11113/aej.v14.19925>

ABSTRACT

Purpose. To determine the gasification parameters for coal beneficiation waste, with consideration of the influence of oxidant composition and flow rate on the resulting syngas characteristics.

The methods. The gasification process was studied using a multifunctional software package for thermochemical process modeling. This modeling tool enabled calculation of gas-phase composition and evaluation of main thermal and chemical parameters of the system. It also allowed to assess how changes in oxidant composition and flow rate affect syngas quality and overall gasification efficiency.

Findings. The results showed that gasification performance is highly sensitive to oxidizer parameters. The maximum CO concentration was achieved at an oxidizer flow coefficient between 0.27 and 0.30. Increasing the oxidizer flow reduced the proportion of reducing components and increased the oxidizing species. In particular, H₂ concentration decreased while H₂O content increased with higher oxidizer flow rates. The study also found that maintaining a gasification temperature of 1873-1973 K requires oxygen enrichment of the air to at least 35%. This ensures syngas composition with approximately 80% reducing and 14% oxidizing components.

The originality. The study established the influence of oxidizer composition and flow rate on the efficiency of gasifying coal beneficiation waste, including both middling and slurry. It identified optimal temperature conditions for maximizing the reducing component content in the syngas. It was found that increasing the oxygen concentration in the oxidizer significantly enhances the share of reducing gases, while keeping oxidizing components within controlled limits. These findings provide a scientifically grounded basis for optimizing high-temperature gasification technologies for coal beneficiation waste.

Practical implementation. The derived gasification characteristics can be used in the design and modernization of energy systems intended for the utilization of coal-based waste at coal beneficiation facilities. The identified oxidizer parameters make it possible to maintain a stable thermal regime and generate syngas with predictable composition. This is essential for the development of autonomous power supply systems. Applying these results can improve energy efficiency, reduce dependence on external energy sources, and minimize environmental impact at industrial sites.

Keywords: *gasification, coal beneficiation waste, syngas, oxidizer.*

дата першого надходження статті до видання	07.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	10.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025