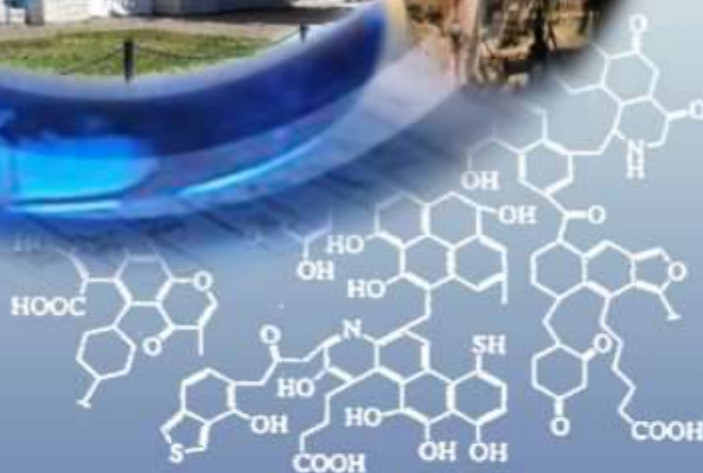


ISSN 1681-309X

ВуглеХімічний журнал



6 2025

Державне підприємство «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)» виконує весь комплекс наукових досліджень щодо вивчення вугілля, підготовки вугільних шихт, коксування вугілля і вугільних шихт, переробки продуктів коксування, очищення стічних вод і захисту навколишнього середовища коксохімічних заводів і виробництв, стандартизації, метрології.



Наказом МОН України від 02.07.2020 № 886

Вуглехімічний журнал включено до категорії **Б** Переліку наукових фахових видань України.

Галузі науки: **технічні, економічні**. Спеціальності: **51; 102; 161**.

Вуглехімічний журнал індексується в міжнародній наукометричній базі

Index Copernicus

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР – с.н.с., к.т.н. О.Л. Борисенко (м. Харків).

Технічні науки (102; 161)

Заступник головного редактора: проф., д.т.н. А.Г. Старовойт (м. Дніпро), д.т.н., С.О.Кравченко (м. Харків)

Члени редколегії: д.т.н. Л.П. Банніков, (м. Харків), проф., д.т.н. О.Б. Гринишин (м. Львів), ст. досл., к.т.н. О.І. Зеленський (м. Харків), д.ф. В.В. Коваль, відп. секретар (м. Харків), доц., д.х.н. В.Ю. Крамаренко (м. Харків), проф., д.т.н. Д.В. Мірошниченко (м. Харків), проф., д.т.н. А. М'яновскі (м. Глівіце, Польща), проф., д.т.н. В.О. Панасенко (м. Харків), проф., д.т.н. С.В. Пиш'єв (м. Львів), д.х.н. Є.О. Посохов (м. Харків), доц., к.х.н., Т.І. Червінський (м. Львів), проф., д.х.н. Т.Г. Шендрік (м. Київ), доц., к.т.н. І.В. Шульга (м. Харків)

Економічні науки (051)

Члени редколегії: доц., к.е.н., Л.А. Буркова (м. Кривий Ріг), проф., д.е.н., В.Л. Дікань (м. Харків), проф., д.е.н., О.І. Савченко (м. Харків), доц., к.е.н., М.В. Маслак (м.Харків), доц., к.е.н., Ю.М. Попова (м. Київ), проф., д.е.н., І.М. Посохов (м. Харків), д.е.н. В.І. Рудика (м. Харків), проф., к.е.н., В.О. Черепанова (м. Харків), проф., д.е.н., О.О. Чуприна (м. Київ), проф., д.е.н., В.П. Яновська (м. Київ)

ЕКСПЕРТНА ГРУПА

Проф., д.т.н. В.М. Гуляев, с.н.с., к.т.н. І.Д. Дроздник, проф., д.т.н. О.М. Касімов, проф., д.т.н. Є.Т. Ковальов, доц., к.т.н. Ю.В. Луценко, к.т.н. А.Ю. Мартинова, к.т.н. М.О. Соловійов, с.н.с., д.т.н. Ф.Ф. Чешко

ВуглеХімічний журнал

6

Науково-виробничий
журнал

Виходить шість номерів
на рік

Заснований у вересні
1993 р

ЗАСНОВНИКИ:

Українська науково-
промислова
асоціація
«УКРКОКС»

ДЕРЖАВНЕ
ПІДПРИЄМСТВО
«УКРАЇНСЬКИЙ
ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ
ВУГЛЕХІМІЧНИЙ
ІНСТИТУТ
(УХІН)»

Державне
підприємство
«Державний інститут
по проектуванню
підприємств
коксохімічної
промисловості»
(ДП «ГИПРОКОКС»)

При передруці матеріалів
посилання на журнал
обов'язкове.

За зміст рекламних матері-
алів редакція
журналу відповідальності
не несе.

Ціна договірна.

Зміст

стор.

- Брик Д.В., Кальмук С.Д.** Рівноважні показники процесу газифікації вугілля водяною парою 3
- Мірошніченко Д.В., Коваль В.В., Борисенко О.Л., Банніков Л.П., Мукіна Н.В., Недбайло С.Г.** Вплив якості вугілля та його підготовки на ефективність трамбування шихти та якість коксу 14
- Коваль В.В., Мірошніченко Д.В., Борисенко О.Л., Мукіна Н.В., Покрасс Б.Й., Недбайло С.Г.** Обґрунтування залучення вітчизняного вугілля Любельського родовища у шихти діючих коксохімічних підприємств України. Повідомлення 2. використання вугілля вугілля пласта П₇ ділянки «Любельська» №3 у коксівних шихтах АМКР: формування та оцінка якості коксу 30
- Кравченко С.О., Когтін А.А.** Підвищення ефективності наявних установок сухого гасіння коксу конструкції ДП «ГИПРОКОКС» при проведенні реконструкції, модернізації 39
- Карножицький П.П.** Використання запасів бурого вугілля Дніпровського буровугільного басейну: розв'язання екологічних проблем України 44
- Шевченко К.В., Григоров А.Б.** Отримання компонентів автомобільних бензинів на базі продуктів переробки горючих сланців 51
- Котляров Є.І., Борисенко О.Л., Шульга І.В.** Оцінка собівартості виробництва коксу за переробки шихт з різними супутніми продуктами переробки вугілля 64

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-1-68

© ДП «УХІН», «Вуглехімічний журнал», 2025
ISSN 1681-309X



Journal of Coal Chemistry

6

Contents

page.

Bimonthly scientific and
technical journal
Founded in 1993

FOUNDERS:

Ukrainian Scientific-
Industrial
Association
«UKRKOKS»

STATE ENTERPRISE
«UKRAINIAN
STATE
RESEARCH
INSTITUTE
FOR CARBOCHEMISTRY
(UKHIN)»

State enterprise «State
Institute for Designing
Enterprises of Coke Oven
and By-product Plants»
(SE «GIPROKOKS»)

Mention of the source when
reprinting papers is
obligatory.

The Editorial Board is not
responsible for the content of
advertising materials.

The price is subject to agree-
ment.

Bryk D.V., Kalmuk S.D. Balanced indicators of the process of coal gasification with water vapour	3
Miroshnychenko D.V., Koval V.V., Borysenko O.L., Bannikov L.P., Mukina N.V., Nedbaylo S.G. Influence of coal quality and its preparation on the efficiency of coal charge tamping and coke quality	14
KovalIV.V., Miroshnychenko D.V., Borysenko O.L., Mukina N.V., Pokrass B.Yo., Nedbailo S.G. Justification of the inclusion of domestic coal of the Lubelskie field in the boilers of operating coke-chemical enterprises of Ukraine. Report 2. use of coal from seam P7 of the “Lyubelska” site No. 3 in AMKR coking blends: formulation and quality assessment of coke	30
Kravchenko S.O., Kogtin A.A. Improving the efficiency of existing dry coke extinguishing installations designed by DP ‘GIPROKOKS’ during reconstruction and modernisation	39
Karnozhytskyi P.P. Use of brown coal reserves in the Dnipro brown coal basin: solving Ukraine's environmental problems	44
Shevchenko K.V., Grigorov A.B. Obtaining components of automotive gasolines based on products of oil shale processing	51
Kotlyarov Ye.I., Borysenko O.L., Shulga I.V. Assessment of the cost of coke production from the processing of mixtures with various co-products of coal processing	64

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-1-68

© SE «UKHIN», Journal of Coal Chemistry, 2025
ISSN 1681-309X

РІВНОВАЖНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ ВОДЯНОЮ ПАРОЮ© Д.В. Брик¹, С.Д. Кальмук²*Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3а, Україна*¹*Брик Дмитро Васильович, докт. техн. наук, с.н.с., зав. відділу проблем геотехнології горючих копалин, e-mail: dmytrobryk@ukr.net*²*Кальмук Соломія Дмитрівна, провідний інженер лабораторії проблем геоелектрохімії при відділі геології і геохімії твердих горючих копалин, e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com*

Роботу присвячено вивченню питання термодинамічної рівноваги в складних хімічних системах із складанням рівнянь стану, які можна використати для розрахунку процесу підземної газифікації вугілля (ПГВ) водяною парою. Запропоновані у статті рівняння дозволяють при заданих тиску P і температурі T розрахувати теплофізичні параметри геотехнологічних процесів, а саме: кількість, склад та теплоту згоряння газоподібних продуктів, коефіцієнт корисної дії та теплоту процесу, оптимальні термодинамічні умови та ін. Такі розрахунки характеризують геотехнологічний процес і дають теоретичну та економічну основу для вибору оптимальних технологічних режимів.

Показано, що застосування парокисневого і водяного (пару) реагентів для процесу газифікації вугілля можна вважати одним із найбільш ефективних засобів. Використання води (водяної пари) порівняно з повітряним дуттям забезпечить підвищення питомого виходу цільового газу, підвищення його теплоти згоряння і газ не містить в собі баласту – азоту.

В роботі наведені результати розрахунку рівноважного складу продуктів газифікації вугілля для “сухого газу” в інтервалі тисків 0,4-32,4 МПа і температур 1023-1273 К (750-1000 °С).

Аналіз отриманих теоретичних показників рівноважного складу продуктів газифікації та теплофізичних характеристик процесу вказує, що оптимальними технологічними параметрами є температура в діапазоні 850-1000 °С і тиски в межах 4-10 МПа. При цих параметрах спостерігається найвищий вміст горючих компонентів генераторного газу (CO , H_2 , CH_4) і, відповідно, найнижчий вміст баласту – CO_2 і H_2O , а також високий вихід кількості газу. Показники процесу ПГВ можуть досягнути 70-75 % від розрахункових при використанні газів піролізу (16-24 МДж/м³).

Процес газифікації з використанням водяного (пароводяного) дуття дозволить покращити технологічні показники за рахунок підвищення якості генераторного газу (газ в основному буде містити CO і H_2), зниження енергоємності і, відповідно, здешевлення собівартості валової продукції.

Ключові слова: вугілля, газифікація, геотехнологічні процеси, продукти, математичне моделювання, термодинамічні умови, рівноважний склад, оптимальні параметри.

Автор для листування С.Д. Кальмук, e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com

Вступ. Для проведення процесу газифікації вугілля використовуються різні реагенти: повітря; кисень; повітря збагачене киснем; водяна пара; водень; карбонат кальцію; діоксид вуглецю, а також їхні суміші. Застосування парокисневого і водяного реагентів – один з найбільш ефективних засобів підвищення рентабельності, що підтверджується теоретичними дослідженнями.

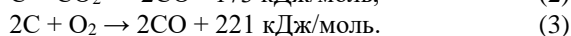
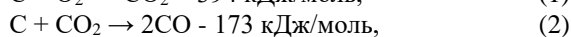
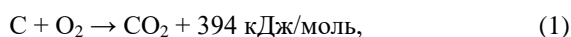
У США, Бельгії, Франції, ФРН, Китаї та Польщі проводяться лабораторні та польові дослідження процесу підземної газифікації вугілля (ПГВ), ведуться національні програми щодо їхнього вдосконалення та застосування.

На наш погляд, застосування такого дуття як вода (водяна пара) порівняно з повітряним дуттям в процесі газифікації вугілля може забезпечити технологічні переваги – підвищення питомого виходу горючого газу, збільшення теплоти згоряння цільового газу (газ в основному буде містити CO та H_2), зменшення об'єму газоподібного реагенту, який закачується в свердловину.

Тобто використання води (водяної пари) в якості реагенту дозволить покращити ефективність ПГВ за рахунок підвищення якості і валового виходу цільового газу, який не містить в собі баласту – азоту.

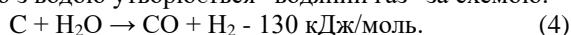
Для газифікації вугілля в якості економічно виправданих реагентів можна розглядати повітря, повітря збагачене киснем, воду (водяну пару), парокисневе дуття.

“Повітряний газ” утворюється в результаті протікання наступних хімічних реакцій:



Отже, сумарний тепловий ефект реакцій (1) і (2) є додатним і рівний 221 кДж/моль O_2 або 110,5 кДж/моль CO . З пониженням тиску і підвищенням температури рівновага реакції (2) зміщується вправо.

При взаємодії розпеченого вугілля з водяною парою або з водою утворюється “водяний газ” за схемою:



Отримання “водяного газу” за реакцією (4) є ендотермічним процесом і для його протікання потрібен додатковий підвід тепла у кількості 39,2 кДж/моль [1]. Рівновага реакції (4) зсувається вправо при підвищенні температури, а підвищення тиску веде до утворення метану (CH_4) та діоксиду вуглецю (CO_2). Ідеальний “водяний газ” має теплоту згорання 11,8 МДж/м³ [1]. Отже, для здійснення реакції (4) необхідний або постійний підвід тепла, або процес потрібно проводити циклічно – цикл нагріву вугілля до 900 -1000 °С, а потім цикл подачі води або водяної пари. Тобто, у поєднанні з екзотермічними реакціями (1)-(3), реакція (4) є цікавою для підземної газифікації вугілля. Принагідно зауважимо, що, теоретично, при газифікації вуглецю максимальна теплотворна здатність генераторного газу, який отримується на повітряному дутті, може досягати 4,4 МДж/м³, а на водяному реагенті, як показано вище, - 11,8 МДж/м³. З цього витікає, що “повітряний” газ є низькокалорійний, а “водяний газ” – висококалорійний, але потребує додаткового підводу тепла. Поєднання цих двох реагентів у технології ПГВ відкриває можливість їхнього поетапного сумісного використання в процесі підземної газифікації вугілля.

Рівноважний склад та теплота згорання синтезованого газу залежать від співвідношення вихідних реагентів та від термодинамічних умов в зоні синтезу. Виходячи із заданого складу вихідних реагентів і термодинамічних умов синтезу, на основі законів рівноважної хімічної термодинаміки, однозначно визначається граничний рівноважний склад синтезованого газу та інші теплофізичні характеристики. Такі обчислення дають надійну основу для вибору оптимальних технологічних параметрів процесу газифікації, а також надають значну допомогу в подальшому проведенні експериментальних робіт.

Загальноприйнята система термодинамічних рівнянь для розрахунку компонентного складу продуктів газифікації в умовах термодинамічної рівноваги базується на умові мінімуму ізобарно-ізотермічного потенціалу Гіббса [1-8]. Застосувавши таку систему рівнянь для процесу газифікації вугілля водою (водяною парою), можна вирахувати як рівноважний склад продуктів газифікації, так і теплофізичні параметри процесу. В цьому і полягає основне завдання статті.

1. Система термодинамічних рівнянь рівноважного складу продуктів газифікації в газовій фазі

З другого закону термодинаміки, принципу нормування мольних часток і умови збереження числа елементів в закритій системі, можна записати наступну систему рівнянь [9]:

$$\sum_{i=1}^m v_i \equiv 1 \quad (5)$$

$$\bar{N} \sum_{i=1}^m n_{ei} \cdot v_i \equiv N_e,$$

де v_i – мольна частка хімічної сполуки i в системі; m – загальне число компонентів в системі; \bar{N} – загальне число молів газу в системі; n_{ei} – число атомів або молекул елемента e в сполуці i ; N_e – число молів хімічного елемента e в системі реагентів.

В процесі газифікації вугілля водяною парою в систему (5) необхідно включити наступні елементи: вуглець, водень і кисень, а в продуктах реакцій слід чекати наступні компоненти: H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 . Тут вуглеводневі сполуки представлені тільки метаном та етаном, оскільки при температурах газифікації вугілля більше 1000 К високомолекулярні вуглеводневі сполуки в рівноважному складі продуктів реакції практично відсутні.

З врахуванням викладеного вище, система рівнянь (5) набуває наступного вигляду:

$$v_{H_2O} + v_{H_2} + v_{CO} + v_{CO_2} + v_{CH_4} + v_{C_2H_6} \equiv 1$$

$$\bar{N} [v_{H_2O} + v_{H_2} + 2v_{CH_4} + 3v_{C_2H_6}] = N_{H_2} = 1 \quad (6)$$

$$\bar{N} [0,5v_{H_2O} + 0,5v_{CO} + v_{CO_2}] = N_{O_2} = 0,5$$

Температури газифікації вугілля є досить високими і можна вважати, що всі компоненти, в тому числі і перегріта водяна пара, знаходяться в стані, близькому до стану ідеального газу при тисках до 20-30 МПа, а тому коефіцієнти активності сполук в газовій фазі можна прирівняти до одиниці. Тоді, з одного боку, для прийнятого набору індивідуальних реакцій, необхідних для розв'язання системи рівнянь (6), константи рівноваги можна виразити через мольні частки, а саме:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2; \quad K_{T_1}^0 = \frac{v_{CO} \cdot v_{H_2}}{v_{H_2O}} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (7)$$

$$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2; \quad K_{T_2}^0 = \frac{v_{CO_2} \cdot v_{H_2}^2}{v_{H_2O}^2} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (8)$$

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4; \quad K_{T_3}^0 = \frac{v_{CH_4}}{v_{H_2}^2} \cdot \frac{P_0}{P} \quad (9)$$

$$2C + 3H_2 \rightarrow C_2H_6; \quad K_{T_4}^0 = \frac{v_{C_2H_6}}{v_{H_2}^3} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right)^2 \quad (10)$$

З іншого боку, стандартні значення констант рівноваги можна визначити незалежно від складу реагентів, використовуючи для цього їх стандартні термодинамічні параметри, що наведені в довідковій літературі. Числові значення констант рівноваги для

реакцій (7)-(10) знаходимо з використанням методу лінійної інтерполяції значень вільних енергій хімічних сполук [10-12] для температур лабораторних експериментів. Значення вільних енергій хімічних сполук для реакцій (7)-(10) і значення констант рівноваги, що їм відповідають, визначені для температур експериментів, наведені в табл. 1.

Виключаючи з системи (6) значення загального числа молів \bar{N} , а також враховуючи надлишок вуглецю

в зоні реакцій, отримуємо наступні рівняння:

$$v_{H_2O} + v_{H_2} + K_{T_1}^0 \cdot \frac{v_{H_2O}}{v_{H_2}} \cdot \frac{P_0}{P} + K_{T_2}^0 \cdot \left(\frac{v_{H_2O}}{v_{H_2}}\right)^2 \cdot \frac{P_0}{P} + K_{T_3}^0 \cdot v_{H_2}^2 \cdot \frac{P}{P_0} + K_{T_4}^0 \cdot v_{H_2}^3 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \equiv 1 \quad (13)$$

Далі з рівняння (11) та враховуючи (7)-(10) з рівняння (13) отримуємо:

$$v_{H_2} \left(1 + \frac{v_{H_2O}}{v_{H_2}}\right) + K_{T_1}^0 \cdot \frac{v_{H_2O}}{v_{H_2}} \cdot \frac{1}{P/P_0} + K_{T_2}^0 \cdot \left(\frac{v_{H_2O}}{v_{H_2}}\right)^2 \cdot \frac{1}{P/P_0} + K_{T_3}^0 \cdot v_{H_2}^2 \cdot \frac{P}{P_0} + K_{T_4}^0 \cdot v_{H_2}^3 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \equiv 1 \quad (14)$$

У кінцевому підсумку з (12) отримуємо квадратне рівняння, з котрого відношення v_{H_2O}/v_{H_2} буде дорівнювати:

$$\frac{v_{H_2O}}{v_{H_2}} = \frac{K_{T_1}^0}{4K_{T_2}^0} \left[\sqrt{1 + \frac{8K_{T_2}^0 \cdot P}{(K_{T_1}^0)^2 \cdot P_0} \left[v_{H_2} + 2K_{T_3}^0 \cdot v_{H_2}^2 \cdot \frac{P}{P_0} + 3K_{T_4}^0 \cdot v_{H_2}^3 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \right]} - 1 \right] \quad (15)$$

Підставляючи (15) в (14), отримуємо рівняння з одним невідомим і далі за формулами (7)-(10) і (15) знаходимо рівноважний склад продуктів газифікації в газовій фазі. Нарешті, виходячи з системи (6), по рівнянню, наприклад, збереження числа молекул кисню (або водню), визначаємо загальне число молів газу по формулі:

$$\bar{N} = \frac{2N_{O_2}}{v_{H_2O} + v_{CO} + 2v_{CO_2}} \quad (16)$$

$$v_{H_2O} + v_{H_2} + v_{CO} + v_{CO_2} + v_{CH_4} + v_{C_2H_6} \equiv 1 \quad (11)$$

$$v_{H_2} + 2v_{CH_4} + 3v_{C_2H_6} - 2v_{CO_2} - v_{CO} \equiv 0 \quad (12)$$

Визначаючи з рівнянь (7)-(10) мольні частки сполук та підставляючи їх вирази для v_{CO} , v_{CO_2} , v_{CH_4} , $v_{C_2H_6}$ в перше рівняння системи рівнянь (6) отримуємо:

2. Результати визначення складу та теплофізичних властивостей рівноважного водовугільного газу

Результати визначення рівноважного складу продуктів газифікації для “сухого” газу в інтервалі температур 1023-1273 К і тисків 0,4-32,4 МПа наведені в табл. 2-3, а графіки залежності складу газу від термодинамічних умов синтезу – на рис. 1-3.

Таблиця 1

Стандартні значення констант рівноваги і значення вільних енергій хімічних сполук в газовій фазі

T, K	C+H ₂ O → CO+H ₂		C+2H ₂ O → CO ₂ +2H ₂		C+2H ₂ → CH ₄		2C+3H ₂ → C ₂ H ₆	
	ΔZ_{T_1} кДж/моль	K_{T_1}	ΔZ_{T_2} кДж/моль	K_{T_2}	ΔZ_{T_3} кДж/моль	K_{T_3}	ΔZ_{T_4} кДж/моль	K_{T_4}
1023	-11,2415	3,7465	-13,2931	4,7678	21,8551	0,7669·10 ⁻¹	114,2996	0,1472·10 ⁻⁵
1073	-18,4219	7,8745	-18,9453	8,3498	27,2561	0,4722·10 ⁻¹	125,0178	0,8283·10 ⁻⁶
1123	-25,6651	15,5930	-24,6184	13,9432	32,7408	0,3008·10 ⁻¹	135,8197	0,4861·10 ⁻⁶
1173	-32,8664	29,0151	-30,2915	22,2841	37,7231	0,2095·10 ⁻¹	145,5331	0,3341·10 ⁻⁶
1223	-40,0886	51,4022	-36,0065	34,4172	43,8358	0,1346·10 ⁻¹	157,5911	0,1878·10 ⁻⁶
1273	-47,3318	87,2573	-41,6587	51,0701	49,4042	0,9424·10 ⁻²	168,4760	0,1235·10 ⁻⁶

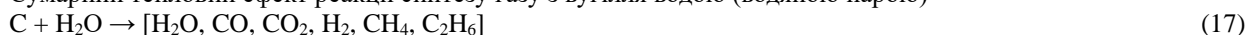
Таблиця 2

Рівноважний склад продуктів реакції $C + H_2O \rightarrow [H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_6]$ для різних термодинамічних умов (сухий газ)

Температура	Тиск, МПа	Рівноважний стан сухого газу в мольних частках (v_i)					Загальне число молів сухого газу, $\bar{N}_{\text{сух}}$
		v_{H_2}	v_{CO}	v_{CO_2}	v_{CH_4}	$v_{C_2H_6}$	
1023 К (750 °C)	0,4	0,4751	0,3331	0,1314	0,0603	$0,1919 \cdot 10^{-5}$	1,6781
	1,2	0,4152	0,2531	0,2064	0,1253	$0,9464 \cdot 10^{-5}$	1,5017
	3,6	0,3266	0,1803	0,2972	0,2009	$0,3332 \cdot 10^{-4}$	1,2908
	10,8	0,2334	0,1210	0,3509	0,2945	$0,9298 \cdot 10^{-4}$	1,2153
	32,4	0,1547	0,0745	0,4034	0,3644	$0,2147 \cdot 10^{-3}$	1,1347
1073 К (800 °C)	0,4	0,4798	0,4009	0,0794	0,0400	$0,1232 \cdot 10^{-5}$	1,7867
	1,2	0,4361	0,3268	0,1458	0,0911	$0,7065 \cdot 10^{-5}$	1,6171
	3,6	0,3599	0,2466	0,2250	0,1684	$0,2918 \cdot 10^{-4}$	1,4355
	10,8	0,2685	0,1734	0,3029	0,2552	$0,8987 \cdot 10^{-4}$	1,2834
	32,4	0,1840	0,1146	0,3681	0,3331	$0,2228 \cdot 10^{-3}$	1,1754
1123 К (850 °C)	0,4	0,4820	0,4478	0,0437	0,0265	$0,7863 \cdot 10^{-6}$	1,8685
	1,2	0,4492	0,3915	0,0940	0,0650	$0,5056 \cdot 10^{-5}$	1,7256
	3,6	0,3862	0,3153	0,1670	0,1315	$0,2408 \cdot 10^{-4}$	1,5401
	10,8	0,3006	0,2339	0,2494	0,2160	$0,8343 \cdot 10^{-4}$	1,3648
	32,4	0,2134	0,1612	0,3258	0,2994	$0,2256 \cdot 10^{-3}$	1,2303
1173 К (900 °C)	0,4	0,4831	0,4748	0,0232	0,0190	$0,5669 \cdot 10^{-6}$	1,9186
	1,2	0,4557	0,4389	0,0568	0,0484	$0,3919 \cdot 10^{-5}$	1,8099
	3,6	0,4014	0,3772	0,1168	0,1046	$0,2079 \cdot 10^{-4}$	1,6372
	10,8	0,3224	0,2967	0,1969	0,1840	$0,7990 \cdot 10^{-4}$	1,4482
	32,4	0,2358	0,2141	0,2804	0,2692	$0,2342 \cdot 10^{-3}$	1,2905
1223 К (950 °C)	0,4	0,4872	0,4880	0,0122	0,0125	$0,3339 \cdot 10^{-6}$	1,9516
	1,2	0,4661	0,4679	0,0326	0,0334	$0,2485 \cdot 10^{-5}$	1,8758
	3,6	0,4218	0,4247	0,0760	0,0774	$0,1469 \cdot 10^{-4}$	1,7340
	10,8	0,3513	0,3551	0,1459	0,1477	$0,6431 \cdot 10^{-4}$	1,5458
	32,4	0,2669	0,2705	0,2319	0,2319	$0,2090 \cdot 10^{-3}$	1,3618
1273 К (1000 °C)	0,4	0,4900	0,4946	0,0065	0,0090	$0,2275 \cdot 10^{-6}$	1,9701
	1,2	0,4724	0,4826	0,0183	0,0245	$0,1762 \cdot 10^{-5}$	1,9186
	3,6	0,4386	0,4635	0,0477	0,0600	$0,1141 \cdot 10^{-4}$	1,7892
	10,8	0,3707	0,4059	0,1028	0,1205	$0,5443 \cdot 10^{-4}$	1,6353
	32,4	0,2896	0,3271	0,1823	0,2008	$0,1939 \cdot 10^{-3}$	1,4457

В процесі газифікації проходить багато хімічних реакцій, котрі супроводжуються виділенням або поглинанням тепла. В роботі [13] наведені формули для підрахунку теплофізичних характеристик синтезованого газу.

Сумарний тепловий ефект реакції синтезу газу з вугілля водою (водяною парою)



дорівнює:

$$Q_1 = -\bar{N} [v_{H_2O} \cdot \Delta H_{H_2O} + v_{CO} \cdot \Delta H_{CO} + v_{CO_2} \cdot \Delta H_{CO_2} + v_{CH_4} \cdot \Delta H_{CH_4} + v_{C_2H_6} \cdot \Delta H_{C_2H_6}] + \bar{N}_{H_2O} \cdot \Delta H_{H_2O} \quad (18)$$

або:

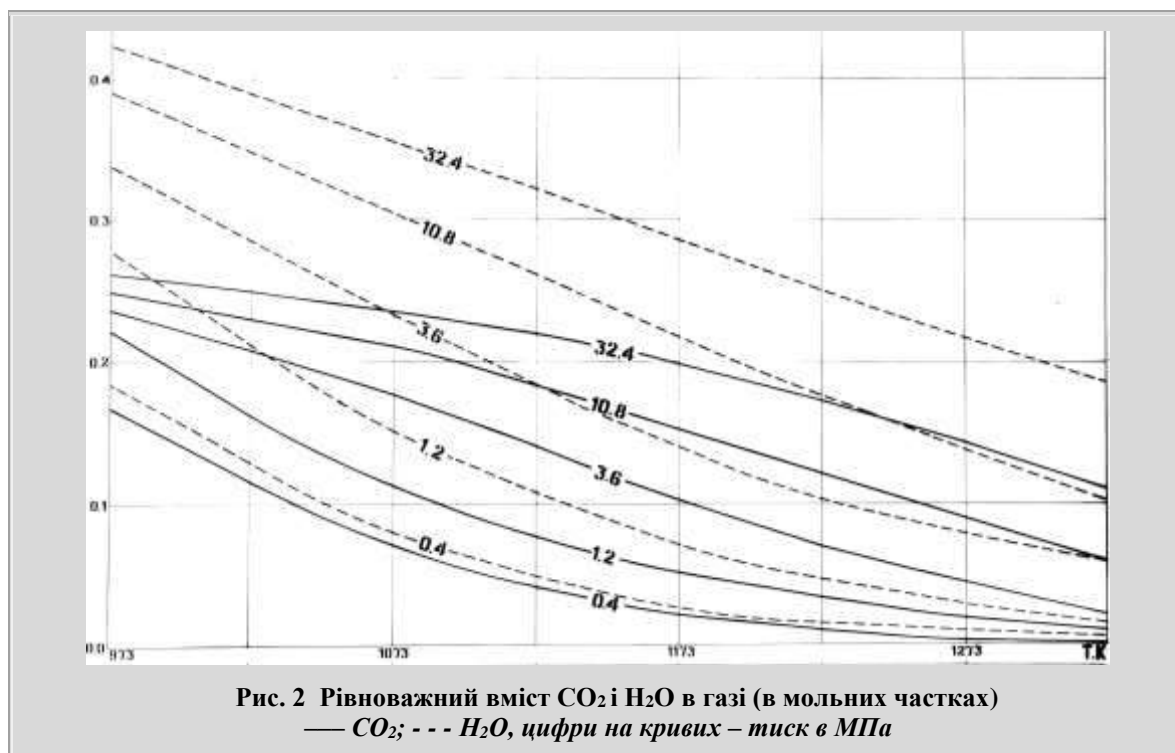
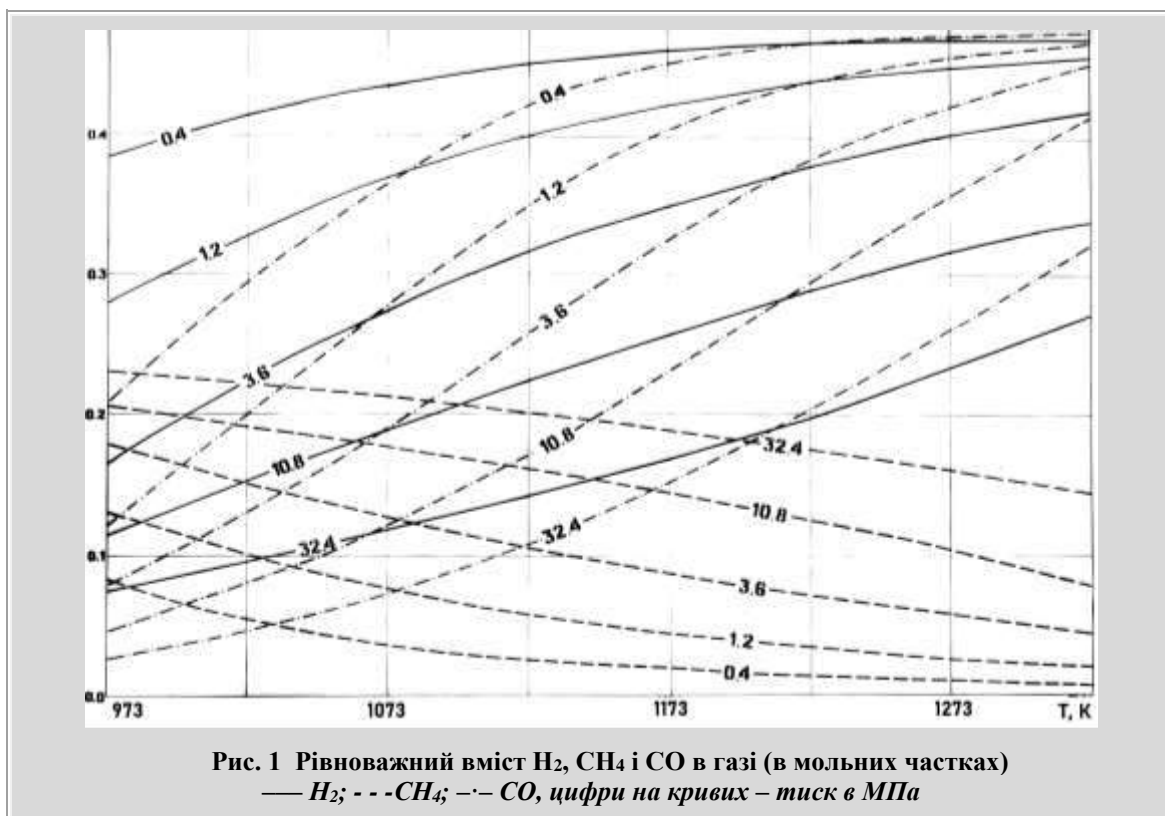
$$Q_1 = -\bar{N} [v_{CO} \cdot \Delta H_{CO} + v_{CO_2} \cdot \Delta H_{CO_2} + v_{CH_4} \cdot \Delta H_{CH_4} + v_{C_2H_6} \cdot \Delta H_{C_2H_6}] + [\bar{N}_{H_2O} - \bar{N} \cdot v_{H_2O}] \cdot \Delta H_{H_2O} \quad (19)$$

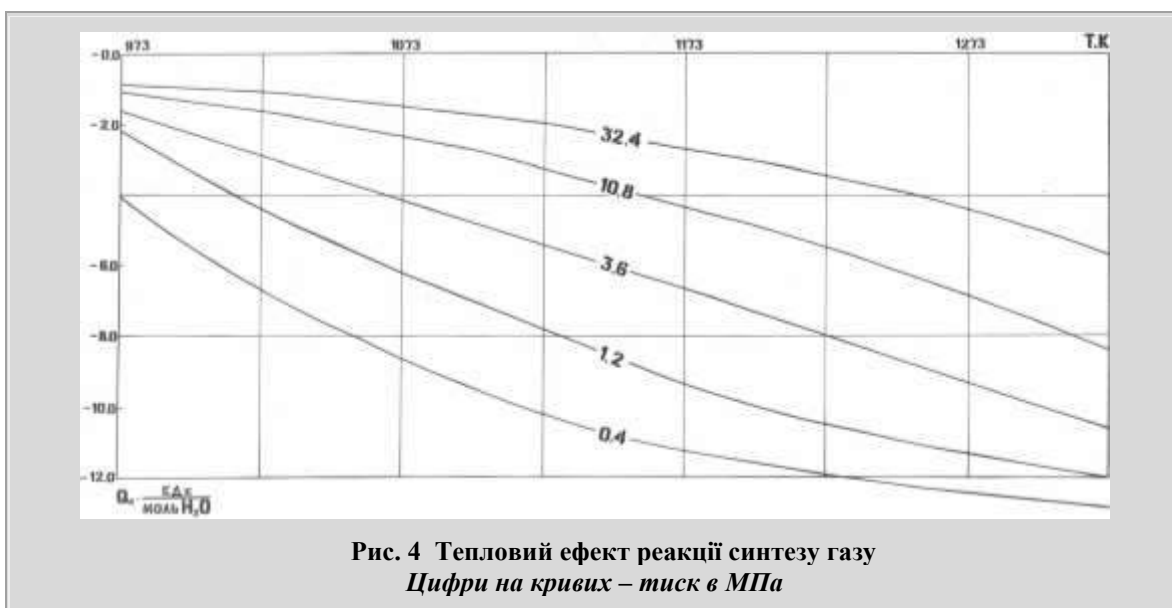
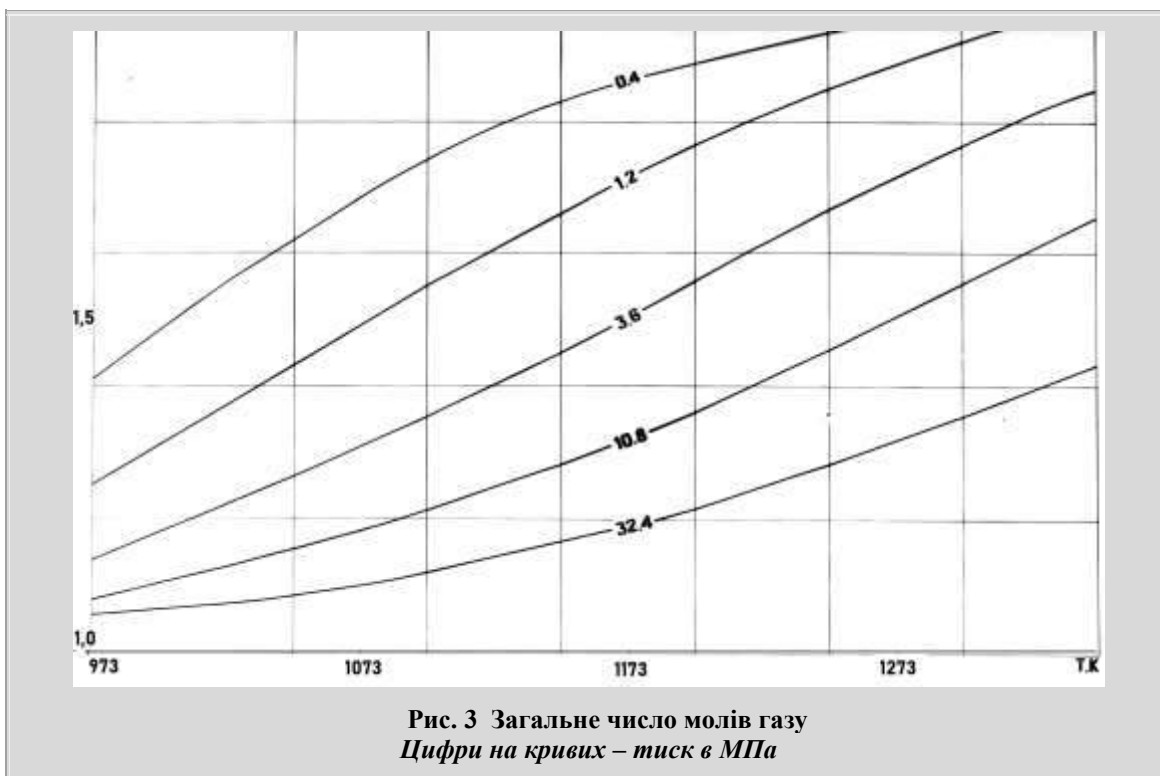
де ΔH_i – теплота утворення сполуки i при температурі 298,15 К; \bar{N}_{H_2O} – закладене в систему число моль води (в даному випадку $\bar{N}_{H_2O} = 1$), а останній член рівняння (19) – це кількість води \bar{N}_{H_2O} , що прореагувала з вугіллям.

Таблиця 3

Рівноважний склад продуктів реакції $C + H_2O \rightarrow [H_2O, H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_6]$ для різних термодинамічних умов (мокрій газ)

Температура	Тиск, МПа	Рівноважний стан сухого газу в мольних частках (v_i)						Загальне число моль газу на моль H_2O , \bar{N}
		v_{H_2O}	v_{H_2}	v_{CO}	v_{CO_2}	v_{CH_4}	$v_{C_2H_6}$	
1023 К (750 °C)	0,4	0,1284	0,4141	0,2903	0,1145	0,0526	$0,1673 \cdot 10^{-5}$	1,5437
	1,2	0,2101	0,3280	0,1999	0,1630	0,0990	$0,7476 \cdot 10^{-5}$	1,3587
	3,6	0,2873	0,2328	0,1285	0,2118	0,1496	$0,2410 \cdot 10^{-4}$	1,2205
	10,8	0,3471	0,1524	0,0790	0,2291	0,1923	$0,6071 \cdot 10^{-4}$	1,1308
	32,4	0,3880	0,0947	0,0474	0,2469	0,2230	$0,1314 \cdot 10^{-3}$	1,0764
1073 К (800 °C)	0,4	0,0823	0,4403	0,3679	0,0729	0,0367	$0,1131 \cdot 10^{-5}$	1,6781
	1,2	0,1551	0,3685	0,2761	0,1232	0,0770	$0,5969 \cdot 10^{-5}$	1,4758
	3,6	0,2365	0,2748	0,1883	0,1718	0,1286	$0,2228 \cdot 10^{-4}$	1,3012
	10,8	0,3068	0,1861	0,1202	0,2100	0,1769	$0,6230 \cdot 10^{-4}$	1,1808
	32,4	0,3578	0,1182	0,0736	0,2364	0,2139	$0,1431 \cdot 10^{-3}$	1,1060
1123 К (850 °C)	0,4	0,0500	0,4579	0,4254	0,0415	0,0252	$0,7470 \cdot 10^{-6}$	1,7909
	1,2	0,1078	0,4010	0,3493	0,0839	0,0580	$0,4511 \cdot 10^{-5}$	1,6002
	3,6	0,1862	0,3143	0,2566	0,1359	0,1070	$0,1960 \cdot 10^{-4}$	1,3993
	10,8	0,2639	0,2213	0,1722	0,1836	0,1590	$0,6141 \cdot 10^{-4}$	1,2449
	32,4	0,3253	0,1440	0,1088	0,2198	0,2020	$0,1522 \cdot 10^{-3}$	1,1446
1173 К (900 °C)	0,4	0,0298	0,4687	0,4607	0,0225	0,0184	$0,5500 \cdot 10^{-6}$	1,8678
	1,2	0,0713	0,4232	0,4076	0,0528	0,0450	$0,3640 \cdot 10^{-5}$	1,7108
	3,6	0,1392	0,3455	0,3247	0,1005	0,0900	$0,1790 \cdot 10^{-4}$	1,5040
	10,8	0,2178	0,2522	0,2321	0,1540	0,1439	$0,6250 \cdot 10^{-4}$	1,3194
	32,4	0,2868	0,1682	0,1527	0,2000	0,1920	$0,1670 \cdot 10^{-3}$	1,1910
1223 К (950 °C)	0,4	0,0178	0,4785	0,4793	0,0120	0,0123	$0,3280 \cdot 10^{-6}$	1,9189
	1,2	0,0463	0,4445	0,4462	0,0311	0,0319	$0,2370 \cdot 10^{-5}$	1,8026
	3,6	0,1013	0,3791	0,3817	0,0683	0,0696	$0,1320 \cdot 10^{-4}$	1,6139
	10,8	0,1774	0,2890	0,2921	0,1200	0,1215	$0,5290 \cdot 10^{-4}$	1,4096
	32,4	0,2536	0,1992	0,2019	0,1720	0,1731	$0,1560 \cdot 10^{-3}$	1,2508
1273 К (1000 °C)	0,4	0,0109	0,4847	0,4892	0,0064	0,0089	$0,2250 \cdot 10^{-6}$	1,9497
	1,2	0,0296	0,4584	0,4703	0,0178	0,0238	$0,1710 \cdot 10^{-5}$	1,8674
	3,6	0,0800	0,4035	0,4264	0,0439	0,0552	$0,1050 \cdot 10^{-4}$	1,7091
	10,8	0,1383	0,3194	0,3498	0,0886	0,1038	$0,4690 \cdot 10^{-4}$	1,5027
	32,4	0,2162	0,2270	0,2564	0,1429	0,1574	$0,1520 \cdot 10^{-3}$	1,3186

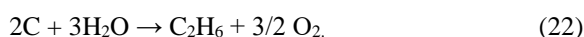




Оскільки на практиці не визначається об'ємний вміст пари води в пробах газу (газ відбирають барботажем через воду), то для розрахунків за експериментальними даними формула (19) не підходить по причині відсутності даних по вмісту

\bar{N}_{H_2O} , тому представимо рівняння (19) лише через реакції в газовій фазі, тобто без води, з врахуванням наступних реакцій:





З рівнянь (20)-(22) можна визначити кількість води, що прореагувала:

$$N_{H_2O,1} = N_{H_2} = \bar{N} \cdot \nu_{H_2}, \quad (23)$$

$$N_{H_2O,2} = 2N_{CH_4} = 2\bar{N} \cdot \nu_{CH_4}, \quad (24)$$

$$N_{H_2O,3} = 3N_{C_2H_6} = 3\bar{N} \cdot \nu_{C_2H_6}. \quad (25)$$

Підставивши (23)-(25) в останній член рівняння (20), отримаємо:

$$Q_1 = \bar{N} \left[(\nu_{H_2} + 2\nu_{CH_4} + 3\nu_{C_2H_6}) \cdot \Delta H_{H_2O} - (\nu_{CO} \cdot \Delta H_{CO} + \nu_{CO_2} \cdot \Delta H_{CO_2} + \nu_{CH_4} \cdot \Delta H_{CH_4} + \nu_{C_2H_6} \cdot \Delta H_{C_2H_6}) \right] \quad (26)$$

Значення теплового ефекту реакції синтез-газу Q_1 наведені на рис. 4.

З рівняння (26) питома теплота утворення газу дорівнюватиме:

$$q_1 = (\nu_{H_2} + 2\nu_{CH_4} + 3\nu_{C_2H_6}) \cdot \Delta H_{H_2O} - (\nu_{CO} \cdot \Delta H_{CO} + \nu_{CO_2} \cdot \Delta H_{CO_2} + \nu_{CH_4} \cdot \Delta H_{CH_4} + \nu_{C_2H_6} \cdot \Delta H_{C_2H_6}) \quad (27)$$

Здатність синтезованого газу виділяти при згоранні тепло визначається його теплотворною здатністю і обчислюється наступним чином (в кДж/моль H_2O):

$$Q_2 = -\bar{N} \left[\nu_{CO} \cdot (\Delta H_{CO_2} - \Delta H_{CO}) + \nu_{H_2} \cdot \Delta H_{H_2O} + \nu_{CH_4} \cdot (2\Delta H_{H_2O} + \Delta H_{CO_2} - \Delta H_{CH_4}) + \nu_{C_2H_6} \cdot (3\Delta H_{H_2O} + 2\Delta H_{CO_2} - \Delta H_{C_2H_6}) \right] \quad (28)$$

Теплоту згорання синтезованого газу можна визначити, використовуючи значення Q_2 , а саме (в кДж/м³):

$$W = \frac{Q_2}{N_0}, \quad (29)$$

де N_0 – об'єм одного моля газу, дорівнює 0,022414 м³ при нормальних умовах (0 °С, 0,1013 МПа) або 0,024 м³ при 25 °С і 0,1013 МПа. Значення W наведені на рис. 5.

Під коефіцієнтом корисної дії процесу газифікації розуміють відношення кількості тепла, що міститься в синтезованому газі, до кількості тепла у вугіллі, котре використане на отримання цього газу, а саме:

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}. \quad (30)$$

Коефіцієнт корисної дії показує частину кількості теплової енергії твердого палива, що перейшла в теплотворну здатність синтезованого горючого газу.

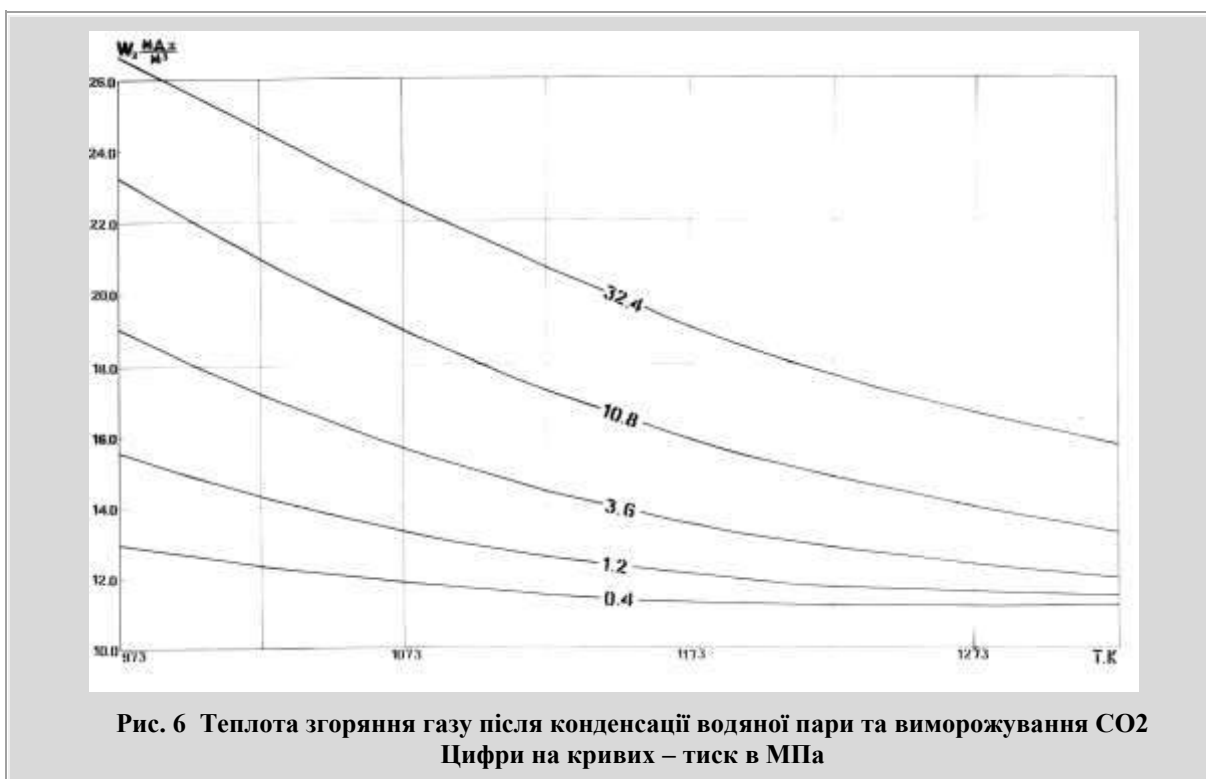
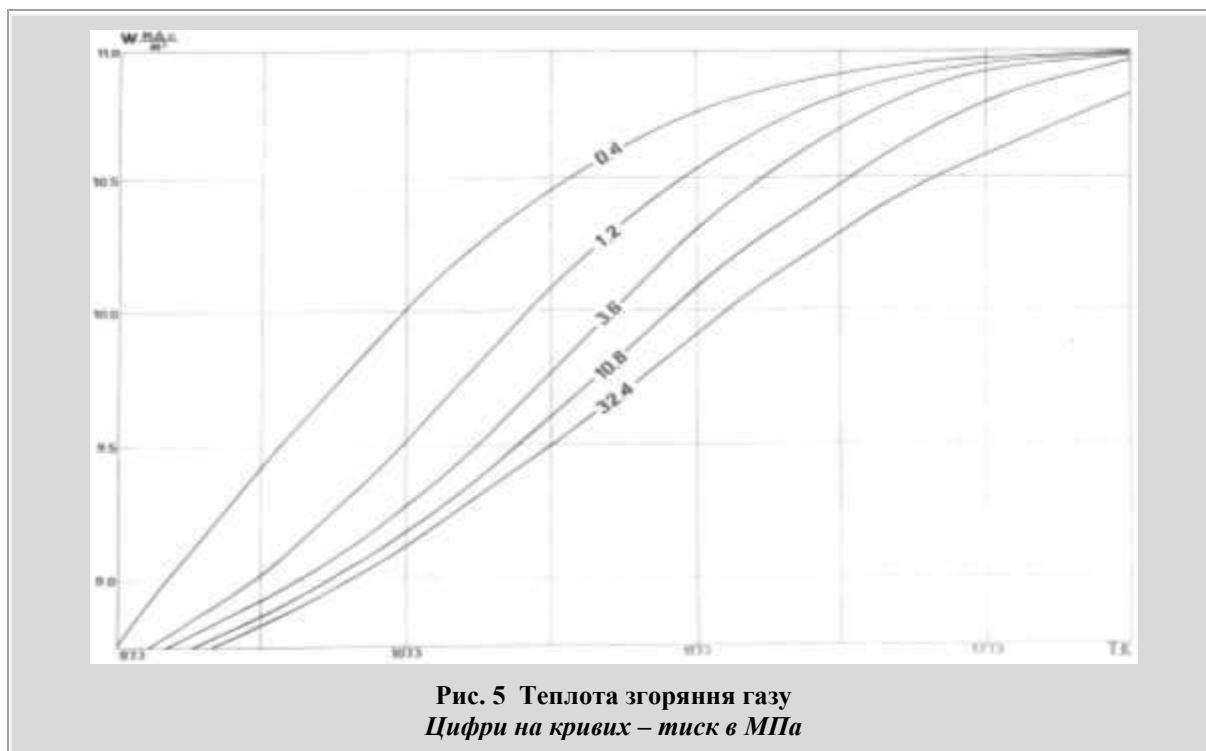
Газ, що отримується, звичайно є забрудненим різними негорючими компонентами. Одні з них видаляються легко (наприклад, вода), видалення інших вимагає певних енергетичних витрат. По цій причині цікавою є теплотворна здатність газу після конденсації парів води:

$$W_1 = \frac{W}{1 - \nu_{H_2O}}, \quad (31)$$

а також теплота згорання газу сумарно без водяної пари і діоксиду вуглецю (рис. 6)

:

$$W_2 = \frac{W}{1 - \nu_{H_2O} - \nu_{CO_2}}. \quad (32)$$

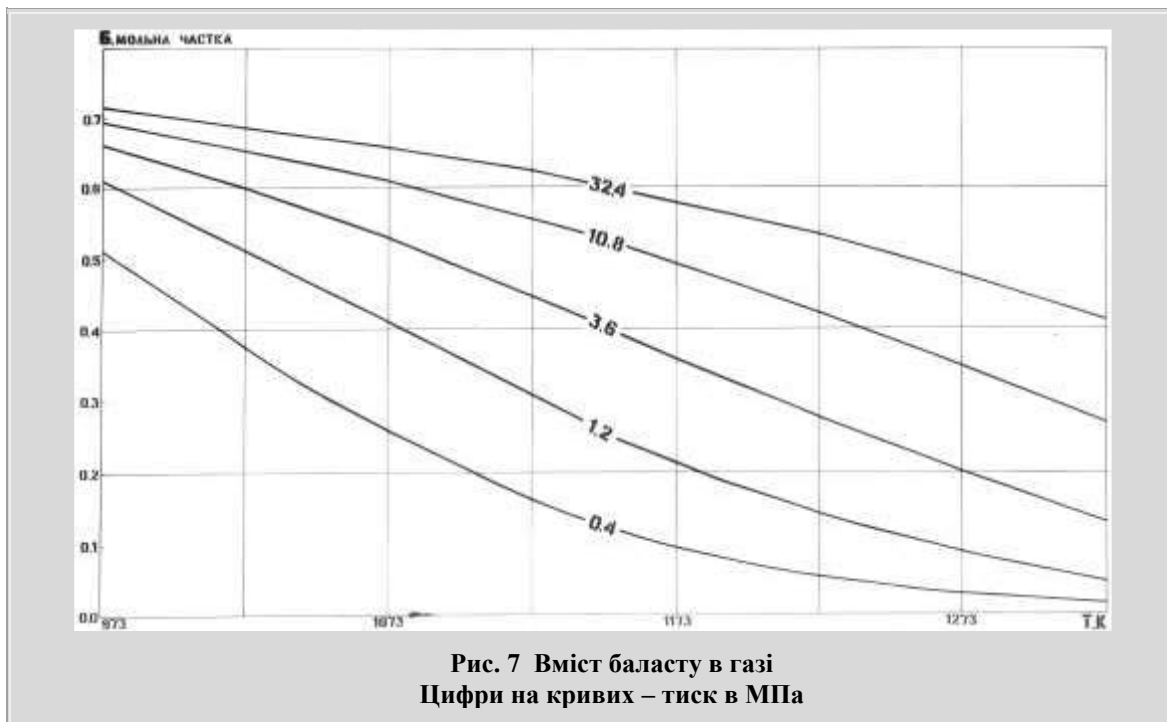


Вміст негорючого баласту визначається за формулою:

$$B = \nu_{H_2O} + \nu_{CO_2}$$

(33)

Дані наведені на рис. 7.



Висновки

Наведені вище параметри генераторного газу на водяному (пароводяному) реагенті ідеалізовані, так як на практиці (як показав досвід роботи на станціях “Підземгаз”) не вдається досягнути теоретичних розрахункових показників, але з використанням газів піролізу (16-24 МДж/м³) показники процесу ПГВ можуть досягнути 70-75 % від розрахункових. Аналіз отриманих теоретичних результатів рівноважного складу продуктів газифікації та теплофізичних властивостей процесу вказує, що оптимальними технологічними параметрами є температури в межах 850-1000 °С і тиски в межах 4-10 МПа. При цих термодинамічних параметрах найвищий вміст горючих компонентів газу і, відповідно, найнижчий вміст баласту CO₂ і H₂O; найвища теплота згоряння газу; високий вихід продукції.

Таким чином, застосування водяного (пароводяного) дуття для підземної газифікації (особливо некондиційних видів палива) дозволить покращити технологічні показники процесу за рахунок підвищення теплоти згоряння підземного генераторного газу приблизно в 2-2,5 рази, зниження енергоємності, що у кінцевому підсумку призведе до здешевлення собівартості валової продукції.

Наведені теоретичні показники процесу газифікації є граничними, тобто вони досягаються при довготривалій витримці реагентів в заданих термодинамічних умовах з наступним досить швидким охолодженням (загартуванням) продуктів реакції до температур, що гальмують розклад продуктів синтезу. Точно виконати ці вимоги в підземних умовах неможливо, тому гранична якість отриманого газу в повній мірі не досягається. Однак, в підземних умовах треба врахувати і процес піролізу вугілля, газу якого при змішуванні з продуктами газифікації істотно збільшують кількість валової продукції і підвищують сумарну теплоту згоряння генераторного газу.

Тому такий складний термохімічний процес перетворення вугілля в газоподібне паливо на місці його залягання, яким є ПГВ, потребує експериментальної перевірки, чому і буде присвячене наступне повідомлення.

Бібліографічний список

1. Стефаник Ю.В. Термодинамічні аспекти застосування водокисневого реагенту в процесі підземної газифікації вугілля / Ю.В. Стефаник, Д.В. Брик, Ю.С. Маковський, Є.С. Федоович / У зб.

Геологія та геотехнологія енергетичних ресурсів України. – К.: Наукова Думка, 1988. – С. 113-121.

2. Чекалюк Е.Б. Термодинамічні засади теорії мінерального походження нафти / Е.Б. Чекалюк. – К.: Наукова Думка, 1985. – 256 с.

3. Стефаник Ю.В. Математичне моделювання термодинамічних умов нафтоутворення / Ю.В. Стефаник // Геологія та геохімія горючих копалин. – 1976. – Вип. 46. – С. 90-92.

4. Гулієнко С.В. Термодинаміка в хімічній інженерії: теоретичні основи. / С.В. Гулієнко, О.В. Гусарова. – Київ, 2023. – 211 с.

5. Русаков В.Ф. Молекулярна фізика і термодинаміка: навчальний посібник. Частина II / В.Ф. Русаков, Н.М. Русакова. – Вінниця: ДонНУ ім. В. Стуса, 2019. – 112 с.

6. Мороз О.І. Основи термодинаміки: навчальний посібник для студентів ВНЗ України / О.І. Мороз. – Суми: СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2009. – 180 с.

7. Хоха Ю.В. Рівняння стану індивідуальних речовин для термобаричних умовин земної кори та верхньої мантії / Ю.В. Хоха, О.В. Любчак, Д.В. Брик // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2006. – № 2. – С. 85-95.

8. Брик Д.В. Теоретичні основи розрахунку геотехнологічних процесів вилучення паливно-

енергетичних ресурсів з надр Землі / Д.В. Брик, Ю.В. Стефаник, Ю.В. Хоха, О.В. Любчак // Вуглехімічний журнал. – 2007. – № 3-4. – С. 64-70.

9. Стефаник Ю.В. Розробка наукових основ підземної газифікації солоного вугілля / Ю.В. Стефаник, Д.В. Брик, О.В. Гвоздевич [та ін.] // Звіт про НДР. № ДР 01880029392. — Львів: Інститут геології і геохімії горючих копалин АН України, 1992. – 200 с.

10. Mohr P. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants / P. Mohr, D. Newell, B. Taylor, E. Tiesinga // High Energy Physics – Phenomenology. – 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03787>.

11. Яцимирський А.В. Фізична хімія. Електрохімія: навч. посібник для студентів ВНЗ / А.В. Яцимирський, О.Ю. Болдирєва, О.С. Роїк. – К.: LAT&K, 2015. – 138 с.

12. Балух Н.М. Словник-довідник з хімії / Н.М. Балух, Г.М. Огороднічук, В.А. Коберська. – Вінниця: ВНАУ, 2014. – 125 с.

13. Стефаник Ю.В. Геотехнологія некондиційного твердого палива / Ю.В. Стефаник. – К.: Наукова Думка, 1990. – 268 с.

Рукопис надійшов до редакції 03.08.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-3-14

Specialty 161. U.D.C. 662.749.2+662.662.3

BALANCED INDICATORS OF THE PROCESS OF COAL GASIFICATION WITH WATER VAPOUR

© D.V. Bryk¹, S.D. Kalmuk²

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the National Academy of Sciences of Ukraine, 3a Naukova str., Lviv, 79060, Ukraine

¹ Bryk Dmytro Vasylovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Geology and Geochemistry of Solid Combustible Minerals, e-mail: dmytrobryk@ukr.net

² Kalmuk Solomiya Dmytrivna, Leading Engineer of the Laboratory of Geoecology Problems of the DGCM, e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com

The work is devoted to studying the issue of thermodynamic equilibrium in complex chemical systems with the compilation of equations of state that can be used to calculate the process of underground coal gasification (UCG) with water vapour. The equations proposed in the article allow, at a given pressure P and temperature T , to calculate the thermophysical parameters of geotechnological processes, namely: the quantity, composition and heat of combustion of gaseous products, the efficiency and heat of the process, optimal thermodynamic conditions, etc. Such calculations characterise the geotechnological process and provide a theoretical and economic basis for selecting optimal technological modes.

It has been shown that the use of steam-oxygen and water (steam) reagents for the coal gasification process can be considered one of the most effective means. Compared to air blowing, the use of water (steam) will increase the specific yield of the target gas, increase its heat of combustion, and the gas does not contain ballast – nitrogen.

The paper presents the results of calculating the equilibrium composition of coal gasification products for 'dry gas' in the pressure range of 0.4-32.4 MPa and temperatures of 1023-1273 K (750-1000 °C).

Analysis of the obtained theoretical indicators of the equilibrium composition of gasification products and the thermophysical characteristics of the process indicates that the optimal technological parameters are



temperatures in the range of 850-1000 °C and pressures in the range of 4-10 MPa. At these parameters, the highest content of combustible components of generator gas (CO, H₂, CH₄) and, accordingly, the lowest content of ballast – CO₂ and H₂O, as well as a high gas yield are observed. UCG process indicators can reach 70-75 % of the calculated values when using pyrolysis gases (16-24 MJ/m³).

The gasification process using water (steam-water) blowing will improve technological indicators by increasing the quality of generator gas (the gas will mainly contain CO and H₂), reducing energy consumption and, accordingly, reducing the cost of gross production.

Keywords: coal, gasification, geotechnological processes, products, mathematical modelling, thermodynamic conditions, equilibrium composition, optimal parameter.

Corresponding author: S.D. Kalmuk, e-mail: solomiya.kalmuk@gmail.com

Manuscript received 2025/08/03

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-14-29

Спеціальність 161. УДК 662.741.3:662.749.2

ВПЛИВ ЯКОСТІ ВУГІЛЛЯ ТА ЙОГО ПІДГОТОВКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАМБУВАННЯ ШИХТИ ТА ЯКІСТЬ КОКСУ

© Д.В. Мірошніченко¹, В.В. Коваль², О.Л. Борисенко³, Л.П. Банніков⁴

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)» (ДП «УХІН»), 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

Н.В. Мукіна⁵

ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", 50095, Дніпропетровська обл., Кривий Ріг, вул. Криворіжсталі, 1, Україна

С.Г. Недбайло⁶

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна

¹ Мірошніченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., гол. наук. співр. вугільного відділу (ВО), e-mail: dymir79@gmail.com

² Коваль Валентин Валерійович, докт. філ. (Ph.D.), с.н.с. ВО, e-mail: kovalen79@gmail.com

³ Борисенко Олександр Людвікович, канд. техн. наук, с.н.с., в.о. директора, e-mail: zd@ukhin.org.ua

⁴ Банніков Леонід Петрович, докт. техн. наук, завідувач хім. відділу, e-mail: ukhinbannikov@gmail.com

⁵ Мукіна Наталія Володимирівна, докт. філ. (Ph.D.), начальниця технічного відділу управління виробництвом КХВ, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com

⁶ Недбайло Сергій Геннадійович, аспірант кафедри Технології переробки нафти, газу та твердого палива

У роботі наведено результати дослідження реальних вугільних шихт різного складу, призначених для коксування методом завантаження у камеру шляхом трамбування. Проблема забезпечення високої якості доменного коксу є однією з ключових для сталеливарної промисловості, адже кокс виконує енергетичну, хімічну та фізичну функції у доменному процесі. В умовах воєнного часу, обмеженого постачання та високої вартості високоякісного коксівного вугілля особливого значення набуває оптимізація складу шихти та вдосконалення технології її підготовки.

Установлено, що зі збільшенням вмісту газового вугілля низької стадії метаморфізму та відповідним зниженням частки вугілля високої стадії метаморфізму спостерігається поступове погіршення якісних показників коксу. Це проявляється у зниженні виходу коксу (від 75,2 % до 73,6 %), зростанні стираності (з 7,3 до 8,0 %), а також у погіршенні «гарячої» міцності (CRI до 40,8 %, CSR до 45 %). Разом з тим поступово зменшується трамбованість шихт (з 22,5 до 21,1 кПа), тиск розпирання (з 6,8 до 5,9 кПа) та робота трамбування, необхідна для досягнення заданої щільності пирога (з 8966 до 6822 Дж). Доведено, що ступінь подрібнення шихти суттєво впливає на енерговитрати процесу: зі зменшенням середнього діаметра частинок робота трамбування знижується з 7407 до 6238 Дж.

Додатково виявлено, що підвищення вмісту вугілля марок ДГ+Г призводить до зростання виходу побічних продуктів коксування, зокрема сирого бензолу та CO_2 , при незмінних властивостях смоли й задовільних характеристиках надсмольної води. Це важливо для ефективності подальшої переробки конденсатів і стічних вод.

Отримані результати свідчать, що за наявних обмежень сировинної бази оптимальним для використання є другий варіант складу шихти. Він забезпечує прийнятну якість коксу при нижчій собівартості та може бути рекомендований для промислового застосування. Практичне значення роботи полягає у визначенні закономірностей впливу петрографічних та гранулометричних характеристик шихт на процес трамбування і властивості коксу, що створює підґрунтя для підвищення ефективності сталеплавильного виробництва в Україні в умовах дефіциту високоякісного коксівного вугілля.

Ключові слова: вугільні концентрати, шихта, підготовка вугільної шихти, трамбований вугільний пиріг, робота трамбування, міцність трамбованого вугільного пирога, якість коксу.

Автор для листування В.В. Коваль, e-mail: kovalen79@gmail.com

Вступ

Проблема якості коксу відіграє ключову роль у функціонуванні доменних печей – основного споживача коксу [1,2]. Кокс у доменному процесі виконує такі функції: енергетичну (забезпечує тепло), хімічну (є джерелом відновлювальних газів та вуглецю для відновлення заліза) та фізичну (підтримує стовп шихтових матеріалів, забезпечує проходження газу через піч та стік рідкого металу в нижню частину печі). Динамічний технологічний розвиток сталеливарної промисловості за останнє десятиліття підвищив значущість фізичної ролі коксу, що, у свою чергу, спричинило зростання вимог до його міцності [3, 4]. На якість коксу впливають численні чинники, зокрема якість вугільної сировини (ступінь метаморфізму, хімічний склад, коксованість, реологічні, петрографічні та мінералогічні характеристики) та параметри підготовки вугільної шихти до коксування (наприклад, насипна щільність, гранулометричний склад та вологість) [5, 6]. Якість коксу також залежить від умов процесу коксування (тривалість та кінцева температура процесу).

Досягнення необхідних показників якості коксу вимагає використання високоякісного коксівного вугілля у великій кількості, що значно підвищує собівартість продукції. Приблизно 75 % витрат становить вартість підготовки вугільної шихти [7]. Загалом, за якісними та цінними параметрами, на світовому ринку спостерігається дефіцит високоякісного коксівного вугілля, постачання якого характеризується великими коливаннями за якістю. Коксівне вугілля щонайменше на 50 % дорожче за слабкоспільне вугілля [8]. Тому в умовах воєнного стану при обмежених можливостях постачання вугілля для забезпечення високих вимог до якості доменного коксу, що визначає його конкурентоспроможність на світовому ринку, зростає необхідність удосконалення технології виробництва коксу із обмеженим вибором сировини. З огляду на поточну та прогнозовану ситуацію, а також стратегічну важливість виробництва сталі, коксівне вугілля було включено Європейською комісією (від 3 вересня 2020 року) до оновленого списку критично важливої сировини для економічного розвитку ЄС [9].

Таким чином, виникає потреба у розробці методів модифікації вугілля та вугільних шихт з урахуванням світових тенденцій і сучасних технологічних підходів. Це дасть змогу збільшити частку дешевшого слабкоспільного вугілля у шихті та отримати кокс високої якості. Одним із рішень є застосування відповідних технологій підготовки шихти для підвищення щільності коксу (через сушіння, змащення, часткове брикетування або ущільнення шихти), що покращує якість коксу та/або дозволяє збільшити частку дешевого вугілля у шихті при збереженні якості продукту [10].

Обмежувальним фактором для переходу коксових батарей з гравітаційного завантаження на технологію трамбування є складність забезпечення стійкості трамбованого пирога. При збільшенні висоти без значного збільшення ширини важко стабілізувати трамбований вугільний пиріг. Це, у свою чергу, значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей вугілля [11, 12]. Попередні дослідження показали, що зі збільшенням метаморфізму твердість вугільного матеріалу збільшується, а швидкість дроблення спочатку збільшується, а потім зменшується, що пов'язано зі зменшенням виходу легких речовин. Так, низькометаморфізоване вугілля є помірно міцним, але більш в'язким, середньометаморфізоване вугілля (через добре розвинене розтріскування) є найслабшим, а високометаморфізований антрацит є найтвердішим і найміцнішим [13, 14].

З практичної точки зору, одним з основних вирішальних факторів, що впливають на стійкість трамбованого пирога, є час або робота, що витрачається на ущільнення трамбованого вугільного пирога. Ця робота, у свою чергу, значною мірою залежить від усіх вищезазначених фізико-механічних властивостей вугілля. Автори поставили за мету дослідити роботу трамбування, яку необхідно застосовувати для досягнення необхідної щільності та стійкості ущільненого вугільного пирога з технологічної точки зору. В рамках цієї роботи вирішувались наступні завдання: – визначити вплив петрографічних характеристик шихти (склад, середній умовний показник відбиття вітриніту R_0 , вміст вітриніту в шихті V_t , вміст суми сплавлених компонентів шихти ΣFC , вихід легких речовин шихти V^{daf}) на її трамбування; – встановити вплив ступеня подрібнення шихти (середній діаметр частинок шихти d_s , клас вмісту <3 мм) на роботу трамбування; – з'ясувати вплив складу вугільних шихт (спікаючої здатності шихти $C_{ш}$ та коксуючої здатності шихти $K_{ш}$) на показники якості коксу (вихід коксу V_k , його механічна міцність M_{25} , стійкість до стирання I_{10} , реакційна здатність CRI та післяреакційна міцність CSR).

1. Матеріали

В якості матеріалів дослідження були використані вугільні концентрати, що формують сировинну базу

коксування КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ».

У дослідженні було використано вугілля від шести постачальників:

- ЗФ «Павлоградська», Україна, марка «ДГ»;
- ЗФ «Добропільська», Україна, марка «Г»;
- Wellmore, США, марка «Ж»;
- Arch Coal Premium, США, марка «Ж»;
- ЗФ «Свято-Варваринська», Україна, марка «К»;
- Illawarra, Австралія, марка «К».

Вугільні концентрати досліджували методами технічного (W^a , A^d , S_t^d , V^{daf}), пластометричного (x , y), петрографічного (R_0 , V_t , S_v , I , L , ΣFC , рефлектограма вітриніту) та елементного (C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} , S_t^d , O^{daf}) аналізів. Крім того, були визначені показники окиснення (Δt) дослідженого вугілля.

Результати досліджень наведено в табл. 1-4. У табл. 5 представлено хімічний склад золи дослідженого вугілля та індекси основності, розраховані за отриманими даними.

Отримані результати досліджень, підтверджують приналежність усіх вугільних концентратів їх заявленим маркам. Також зазначимо, що досліджене вугілля не окиснене ($\Delta t \leq 6$ °C).

Таблиця 1

Технологічні властивості дослідженого вугілля

Постачальник, країна	Марка	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Показник окиснення, °C	Тиск розпирання, кПа
		A^d	S_t^d	V^{daf}	X	Y		
ЗФ «Павлоградська», Україна	ДГ	8,4	1,32	43,6	56	9	5,0	0,0
ЗФ «Добропільська», Україна	Г	8,5	1,32	38,5	42	14	3,4	0,0
Wellmore, США	Ж	9,7	0,81	32,0	9	19	3,8	3,8
Arch Coal Premium, США	Ж	8,9	0,76	35,0	23	31	1,3	2,5
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	9,1	0,64	26,4	14	13	0,9	16,8
Illawarra, Австралія	К	9,1	0,45	26,3	27	14	5,1	6,8

* Дослідження проводили після вільного розширення трамбованого пирога на 10 мм.

Відзначимо, що дослідження щодо тиску розпирання проводили при трамбованому завантаженні вугільного пирогу, тож в разі насипного завантаження, значення P_n будуть вищими.

Вугілля газової групи (ДГ і Г) ЗФ «Павлоградська» та ЗФ «Добропільська» характеризується значенням виходу легких речовин на рівні відповідно 43,6 та 38,5 %, рівнем товщини пластичного шару 9 і 14 мм, вмістом фіузенізованих компонентів 31 і 25 %, середнім

довільним показником відбиття вітриніту 0,60 та 0,77 %.

Американське вугілля жирної групи Wellmore та Arch Coal Premium, характеризується близькими значеннями вмісту вітриніту 77 та 72 %; сумою фіузенізованих компонентів 20 і 24 %; показником відбиття вітриніту 1,02 і 0,98 %; сумою складових вітриніту, що знаходяться в стадії жирного вугілля 81 і 84 % та вмістом сірки 0,81 та 0,76 % відповідно. Натомість є певні розбіжності щодо значень товщини пластичного шару.

Концентрат Wellmore має товщину пластичного шару 19 мм, а Arch Coal Premium 31 мм.

Два зразки коксівного вугілля ЗФ «Свято-Варваринська» та Шавагга мають подібні властивості.

Вони характеризуються вмістом летких речовин 26,3 %; вмістом сірки 0,45–0,64 %; товщиною пластичного шару 13–14 мм; середнім відбиттям вітриніту 1,23 % і 1,27 %; вмістом золи 9,1 %.

Таблиця 2

Петрографічна характеристика дослідженого вугілля

Постачальник, країна	Марка	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній довольний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %					
								0,50-0,79	0,80-0,89	0,90-1,19	1,20-1,49	1,50-1,69	1,70-2,59
		Vt	Sv	I	L	ΣFC		R ₀	Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту				
							ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС	П	
ЗФ «Павлоградська», Україна	ДГ	66	0	31	3	31	0,60	99	1	0	0	0	0
ЗФ «Добропільська», Україна	Г	72	0	25	3	25	0,77	58	34	8	0	0	0
Wellmore, США	Ж	77	0	20	3	20	1,02	5	11	81	3	0	0
Arch Coal Premium, США	Ж	72	0	24	4	24	0,98	3	10	84	3	0	0
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	84	1	14	1	15	1,23	0	0	41	59	0	0
Шавагга, Австралія	К	68	0	32	0	32	1,27	0	0	31	65	3	0

Таблиця 3

Елементний склад дослідженого вугілля

Постачальник, країна	Марка	Елементний склад (сухий беззолний стан), %				
		C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	S _t ^d	O _d ^{daf}
ЗФ «Павлоградська», Україна	ДГ	83,65	6,16	1,43	1,32	7,44
ЗФ «Добропільська», Україна	Г	83,89	5,91	1,83	1,32	7,05
Wellmore, США	Ж	86,93	5,56	1,70	0,81	5,00
Arch Coal Premium, США	Ж	86,76	5,80	1,63	0,76	5,05
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	87,63	5,34	1,72	0,64	4,67
Шавагга, Австралія	К	85,55	5,42	1,68	0,45	6,90

Таблиця 4

Гранулометричний склад вугільних концентратів КХП ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

Постачальник, країна	Марка	Гранулометричний склад (мм), %									Середній діаметр частинок, мм
		>50	50–25	13–25	6–13	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	0–3	
ЗФ «Павлоградська», Україна	ДГ	8,2	11,1	14,7	20,1	15,0	12,9	6,0	11,9	30,9	16,03
ЗФ «Добропільська», Україна	Г	6,0	11,4	19,4	21,1	14,4	12,5	5,2	10,0	27,7	15,41
Wellmore, США	Ж	0,0	4,0	8,6	19,8	20,6	22,1	8,6	16,3	47,0	6,50
Arch Coal Premium, США	Ж	0,0	0,0	1,4	3,0	9,1	21,8	16,9	47,8	86,5	1,64
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	0,0	7,6	4,1	12,6	15,3	17,9	8,0	34,5	60,3	6,02
Шавагга, Австралія	К	0,0	2,5	6,1	15,5	15,4	14,9	8,6	37,0	60,5	4,71

Таблиця 5

Хімічний склад золи дослідженого вугілля

Постачальник, країна	Марка	Хімічний склад золи, %								Індекси основності	
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	I _i	B _o
ЗФ «Павлоградська», Україна	ДГ	46,83	25,17	13,63	1,77	1,89	4,44	2,77	2,25	0,340	5,07
ЗФ «Добропільська», Україна	Г	42,68	25,33	16,6	1,39	5,60	2,02	1,94	2,37	0,405	5,60
Wellmore, США	Ж	49,73	29,41	12,3	0,75	1,23	0,52	3,24	1,08	0,228	3,25
Arch Coal Premium, США	Ж	44,37	37,70	8,61	0,84	2,40	0,43	1,34	3,14	0,166	2,27
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	48,61	33,36	5,21	0,34	1,69	4,62	3,79	1,03	0,191	2,36
Шлаварра, Австралія	К	51,61	26,14	9,97	1,51	1,40	2,19	2,95	2,43	0,230	2,83

Що стосується гранулометричного складу дослідженого вугілля (табл. 4), то найкрупнішим є вугілля газової групи. Так тільки в ньому спостерігається присутність класу >50 мм (від 6,0 до 8,2 %). Середній діаметр частинок вугілля цієї групи 15,41–16,03 мм, помел 27,7–30,9 %, а вміст класу <0,5 мм 10,0–11,9 %. Жирне вугілля Arch Coal Premium є найдрібнішим з представленого вугілля і не потребує обов'язкового додаткового дроблення ($d_s = 1,64$ мм; $\Sigma 0-3$ мм = 86,5 %; $\Sigma 0-0,5$ = 47,8 %).

Вміст вуглецю і кисню (табл. 3) корелюється зі ступенем метаморфізму дослідженого вугілля. При підвищенні ступеня метаморфізму відбувається зростання вмісту вуглецю з 83,65 до 87,63 % і, відповідно, зниження вмісту кисню з 7,44 до 4,67 %.

Також задля визначення цінності марки вугілля як сировини для отримання коксу заданої якості з точки зору його спікливості у табл. 6 наведені результати досліджень пластичних властивостей вугілля за методом Гізелера (ДСТУ ISO 10329:2018).

Таблиця 6

Пластичні властивості дослідженого вугілля за методом Гізелера

Постачальник, країна	Марка	Пластичні властивості вугілля за методом Гізелера				
		T _p , °C	T _{max} , °C	T ₃ , °C	ΔT, °C	F _{max} , ddpm
ЗФ «Павлоградська», Україна	ДГ	402	427	450	48	10
ЗФ «Добропільська», Україна	Г	404	427	470	66	1412
Wellmore, США	Ж	407	443	479	72	837
Wellmore (повтор), США	Ж	404	447	482	78	1050
Arch Coal Premium, США	Ж	349	451	484	105	40184
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	422	455	482	60	29
Шлаварра, Австралія	К	403	454	490	87	505

Аналізуючи представлені дані, слід відзначити, що максимальними найвищі дилатації ними (спікливими) властивостями характеризується вугілля марки «Ж» Arch Coal Premium, яке має найвищу максимальну пластичність F_{max} – 40184 ddpm, найменшу початкову температуру розм'якшення – 349 °C, інтервал пластичності ΔT = 105 °C. Вугілля Шлаварра марки «К» має найвищу температуру затвердіння – 490 °C, ΔT = 87 °C.

Спікливість є важливою властивістю вугілля, як сировини для отримання коксу, що обумовлює термічну деструкцію вугілля та утворення напівкоксу і коксу в процесі його карбонізації. Рівень вмісту вітриніту середніх стадій метаморфізму (R₀=0,9-1,49 %) відображає наявність складових вітриніту, які в процесі термічної деструкції утворюють значну кількість термостійких рідких продуктів, здатних, взаємодіючи з залишковим матеріалом деструкуючих зерен та інертними складо-

вими органічної маси, утворювати кокс різної міцності. Кількість зазначених складових вітриніту у перерахунку на органічну масу вугілля, що характеризує спікливість шихти (C_ш), розраховується за формулою:

$$C_{ш} = \frac{\Sigma(0,90 - 1,49)Vt}{100} \quad (1)$$

де $\Sigma(0,90 - 1,49)Vt$ - вміст складових вітриніту з величиною показника відбиття від 0,90 до 1,49 %;

Vt – вміст мацералів групи вітриніту, %.

Чим вище величина комплексного показника C_ш, тим кращі характеристики міцності одержуваного з цієї шихти коксу. Показник коксівності шихти (K_ш) є відношенням сумарного вмісту складових її вітриніту з показником відображення від 0,9 до 1,49 %, які виявляють високу спікливість і мають здатність приймати опіснуючі присадки, і мацералів групи ліптиніту, до

суми опіснюючих матеріалів і неспікливих складових вітриніту > 1,70 %. Природно, що чим вище це відношення, то більша ймовірність за інших рівних умов (середнього довольного показника відбиття і виходу легких речовин) отримання низькоподрібнюваного коксу і такого, що мало стирається.

Цей показник розраховується за формулою:

$$K_{\text{ш}} = \frac{(\frac{\sum(0,90-1,49)Vt}{100} + L)}{\sum FC + \sum(\geq 1,70)Vt/100}, \quad (2)$$

де $\sum(0,90 - 1,49)$ - вміст складових вітриніту з величиною показника відбиття від 0,90 до 1,49 %; Vt - вміст мацералів групи вітриніту, %; L - вміст мацералів груп ліптиніту, %; $\sum FC$ - сума фюзенізованих компонентів $(I+2/3Sv)$, %; $\sum(\geq 1,70)Vt/100$ - вміст складових вітриніту з величиною показника відбиття 1,70 % і більше.

Згадані показники $C_{\text{ш}}$ і $K_{\text{ш}}$ розраховані щодо досліджених вугільних шихт та наведені в розділі 3.2.

2. Методи

Для визначення якісних показників вугілля, вугільних шихт і отриманого доменного коксу використовувалися стандартні методи згідно наступних нормативних документів: ISO 17246:2010; ISO 18283:2022; ISO 17247:2020; ISO 334:2020; ISO 1170:2020; ISO 7404-5:2009 - Part 5; ISO 7404-3:2009 - Part 3; ISO 1953:2015; ISO 10329:2018; DSTU 7611:2014; DSTU 7722:2015; ISO 18894:2018; DSTU 9045:2020.

Окрім вищенаведених стандартних методів показників якості, трамбування вугільних шихт, міцність трамбованого пирога на зсув та коксування в лабораторній печі проводили згідно методик, що наведені в цьому розділі нижче.

2.1. Трамбування

Трамбування вугільних шихт відбувалося у збірно-розбірній матриці (рис. 1) таким чином, щоб по досягненні заданої щільності вугільного пирога, фіксувалася докладена робота.

Докладену роботу трамбування розраховували за формулою (3):

$$A = nFs \quad (3)$$

де A - робота трамбування вугільної шихти, Дж; n - кількість падінь молота при трамбуванні вугільної шихти, шт; F - сила падіння молота при трамбуванні вугільної шихти; H ; S - висота падіння молота при трамбуванні вугільної шихти, 0,51 м.

Своєю чергою, показник F розраховується за формулою (4):

$$F = mg, \quad (4)$$

де m - маса молота, 7,8 кг; g - прискорення вільного падіння, 9,8 м/с².



Рис. 1 Матриця для трамбування

Враховуючи, що трамбування відбувається за рахунок докладання сили падіння молота, що має фіксовану масу та висоту падіння, змінною величиною залишається при цьому лише кількість ударів молота, а, відповідно, робота і/або час трамбування.

2.2. Міцність трамбованого вугільного пирога на зсув

Також на окремих зразках підготовлених вугільних пирогів визначали трамбованість шихт (міцність трамбованого вугільного пирога на зсув). Світлина пристрою зображена на рис. 2.

Трамбований вугільний пиріг встановлюють на стіл (2) приладу так, щоб її коротка задня грань щільно прилягала до обмежувального краю столу по всій довжині, а рівно половина довшої сторони нависала зі столу.

В усіх експериментах пиріг встановлювали верхньою гранню догори, без перевертання після виймання з матриці. Однією рукою тримали пиріг, другою встановлювали пластину (4), проводячи її через два штифти (3) приладу, і злегка притискали гайками. Гайки закручували до упору з невеликим зусиллям, щоб уникнути порушення внутрішньої структури пирога.

Після фіксації трамбованого пирога на столі на його консольну частину встановлювали металеву пластину (6), а на неї - контейнер (9), так щоб він торкався бокового торця пластини.

Товщина пластини була приблизно вдвічі меншою за товщину накладки.

Далі з бункера повільно засипали свинцевий дріб у контейнер, спостерігаючи за процесом. Як тільки пиріг ламався, засипку припиняли. Після цього зважували контейнер разом із дробом і пластиною з точністю до 1 г.



Рис. 2 Пристрій для визначення ущільнення (міцності трамбованого вугільного пирога на зсув, $\sigma_{зз}$): 1 – основа, 2 – стіл, 3 – трамбований вугільний пиріг, 4 – металева пластина, 5 – напрямна контейнера, 6 – контейнер, 7 – рухомий пристрій бункера, 8 – бункер зі свинцевим дробом, 9 – кран вмикання/вимикання

Міцність трамбованого пирога на зсув розраховували за формулою:

$$\sigma_{зз} = \frac{g \cdot P}{S}, \quad (5)$$

де P – загальна маса контейнера з дробом та пластини, кг; S – площа поперечного перерізу зразка, см^2 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Площу поперечного перерізу S (см^2) розраховували за формулою:

$$S = b \cdot h, \quad (6)$$

де b – ширина пирога, см; h – висота пирога, см.

Маса пирога (тобто маса шихти, завантаженої в розбірну матрицю установки) становила 1,1 кг, маса ударного вантажу – 42 кг, висота падіння – 0,45 м, кількість ударів – 3. Повна робота трамбування становила 56,7 $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, а питома – 51,54 $\text{кг} \cdot \text{м/кг}$, або 505 Дж/кг. Така операція трамбування відповідає промислового процесу на установках типу SLEM. Міцність трамбованого пирога визначали на паралельних зразках.

2.3. Коксування

Підготовлені шихти були прококовані в 5-кг лабораторній печі конструкції ДП «УХІН» (Рис. 3).

У попередньо нагріту до 1100 °С електропіч вставляли металеву камеру (ширина – 150 мм, довжина – 270 мм, висота – 300 мм). Камеру завантажували 4,5–5,0 кг вугільної суміші класу подрібнення <3 мм, з вологістю 11±0,5 % та щільністю ~1150 кг/м^3 . Після досягнення 950±10 °С у центрі завантаження процес зупиняли. Швидкість коксування становила ~25 мм/год.



Рис. 3 Лабораторна піч коксування конструкції ДП «УХІН»

$$\text{Швидкість коксування} = \frac{\text{ширина} / 2}{\text{час коксування}}, \quad (7)$$

де: швидкість коксування – це швидкість коксування, мм/год; ширина/2 – половина ширини коксової камери, мм; час коксування – час коксування, год.

Тривалість експерименту – 2 год 50 хв – 3 год. Кокс охолоджували природним способом протягом 18 годин.

Охолоджений кокс зважували, визначали вихід сухого валового коксу з сухої шихти за формулою:

$$V_k = \frac{m_k}{m_{ш}} 100 \quad (8)$$

де: V_k – вихід сухого коксу (%); m_k – маса сухого коксу (г); $m_{ш}$ – маса сухої шихти (г).

Отриманий кокс піддавали дробленню: його 4 рази скидали з висоти 1 м на металеву плиту, а потім просіювали через сита з отворами Ø70, 60, 50, 40, 25 і 10 мм.

Кокс >25 мм після скидання руйнували в закритому 4-секційному барабані (діаметр секції – 450 мм, 300 обертів, швидкість – 45 об/хв).

Кокс поділяли на 4 порції (790–800 г кожна), відповідно до пропорцій фракцій >25 мм. Кожну порцію поміщали в окрему секцію барабана. Після 300 обертів кокс знову просіювали (Ø25 мм і Ø10 мм), і визначали: M_{25} – механічну міцність коксу (вихід >25 мм); I_{10} – стиранильність коксу (вихід <10 мм).

3. Результати та обговорення

З метою визначення впливу складів вугільних шихт на показники їх трамбованості та якості отриманого коксу були розроблені та складені 4 варіанти вугільних шихт (табл. 7).

Таким чином, вміст вугілля марок «ДГ+Г» збільшувався з 1-го по 4-й варіант з 37 до 49 % за рахунок поступового зменшення вугілля марки «К» з 57 до 45 %.

Відзначимо, що варіант 2 відповідає плановому складу шихти КХВ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» для коксування.

Технологічні властивості та петрографічна характеристика вугільних шихт, які були використані для про-

ведення лабораторних коксувань, наведені в табл. 8 і 9. Аналізуючи представлені дані, можна стверджувати, що отримані значення технологічних властивостей досліджених вугільних шихт, змінюються у відповідності до зміни їх марочного складу.

Таблиця 7

Марочний і компонентний склади вугільних шихт

Постачальник	Марка	Участь в шихті, %			
		1	2	3	4
ЗФ «Павлоградська»	ДГ	31	34	37	40
ЗФ «Добропільська»	Г	6	7	8	9
Всього ДГ+Г		37	41	45	49
Wellmore	Ж	3	3	3	3
Arch Coal Premium, США	Ж	3	3	3	3
Всього Ж		6	6	6	6
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	52	48	44	40
Шлаварга	К	5	5	5	5
Всього К		57	53	49	45
Разом		100	100	100	100

Таблиця 8

Технологічні властивості дослідних вугільних шихт

Варіант	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм	
	Wa	Ad	Sdt	Vdaf	X	Y
1	1,4	8,9	0,92	31,4	30	15
2	1,4	8,8	0,94	32,4	29	15
3	1,3	8,8	0,95	32,7	35	14
4	1,6	8,7	0,95	33,7	33	14

Таблиця 9

Петрографічна характеристика вугільних шихт

Варіант	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній довірливий показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %						C _ш , %	K _ш
							0,50-0,79	0,80-0,89	0,90-1,19	1,20-1,49	1,50-1,69	1,70-2,59		
	Vt	Sv	I	L	ΣFC		R0	Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту						
							ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС	П		
1	75	1	21	3	22	0,93	35	3	29	33	0	0	46,5	2,3
2	75	1	22	2	23	0,91	39	3	27	31	0	0	43,5	2,0
3	74	0	23	3	23	0,89	42	4	26	28	0	0	40,0	1,9
4	73	0	24	3	24	0,86	46	4	24	26	0	0	36,5	1,6

З підвищенням вмісту газового вугілля у вугільних шихтах з 37 до 49 % відбувається підвищення показника V^{daf} з 31,4 до 33,7 %, а також зниження показника Y з 15 до 14 мм. Що стосується петрографічної характеристики, то з підвищенням вмісту газового вугілля відбувається зниження показників R₀ з 0,93 до 0,86 %, C_ш з 46,5 до 36,5 % та K_ш з 2,3 до 1,6. Вологість усіх вугільних шихт була однаковою і складала ~11,5 %, вміст

класів 0-3 мм ~90 %; щільність ~1,017 т/м³ (на сухий стан) або ~1,15 т/м³ (на вологий стан).

В табл. 10 представлені результати визначення гранулометричного складу вугільних шихт. Необхідно зазначити, що варіант 3 вугільної шихти було підготовлено також з помелом 88,0; 89,5; 90,5 (фактичне значення – 90,4 %) та 92,0 % (фактичне значення – 91,8 %).

Таблиця 10

Гранулометричний склад опитних вугільних шихт

Варіант	Гранулометричний склад (мм), %						Середній діаметр частинок, мм
	>6	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3	
1	0,5	9,1	28,6	21,4	40,3	90,3	1,30
2	0,9	8,9	31,1	18,8	40,4	90,3	1,35
3	0,8	9,0	35,2	17,0	38,0	90,2	1,40
3.1	1,8	10,2	28,7	19,8	39,5	88,0	1,45
3.2	1,2	9,3	29,4	21,6	38,5	89,5	1,38
3.3	0,8	8,8	25,7	23,5	41,2	90,4	1,26
3.4	0,4	7,8	25,0	28,2	38,6	91,8	1,20
4	0,8	9,1	36,8	16,0	37,3	90,1	1,44

3.1. Вплив складу вугільних шихт та їх гранулометричного складу на показники трамбуваності, щільності, тиску розпирання та роботи трамбування

В табл. 11 наведено показники трамбуваності, щільності, тиску розпирання, кількість ударів молоту та

робота, що знадобилась для досягнення заданої щільності у $1,15 \text{ т/м}^3$ на вологий стан дослідних вугільних шихт.

Таблиця 11

Показники трамбуваності, щільності, тиску розпирання вугільних шихт

Варіант	Вміст вологи, %	Трамбованість, кПа	Щільність, г/см ³		Тиск розпирання, кПа	Кількість ударів, шт	Робота трамбування, Дж
	W _t	δ _{зз}	γ _{вол}	γ _{сух}	P ¹⁰	N	A
1	11,5	22,5	1,192	1,055	6,8	230	8966
2	11,3	22,1	1,183	1,049	6,6	190	7407
3	11,2	21,4	1,178	1,046	6,3	180	7017
3.1	11,2	22,5	1,150	1,021	-	190	7407
3.2	11,1	20,6	1,146	1,019	-	180	7017
3.3	11,0	14,4	1,110	0,988	-	170	6627
3.4	11,1	18,9	1,138	1,013	-	160	6238
4	11,4	21,1	1,166	1,033	5,9	175	6822

З даних табл. 11 видно, що зі зростанням вмісту газового вугілля в шихтах і зниженням вмісту вугілля марки «К», відповідно, зниженням їх вмісту вітриніту V_t та середнього довільного показника його відбиття

R₀ спостерігається поступове зниження трамбуваності шихт з 22,5 до 21,1 кПа, тиску їх розпирання – з 6,8 до 5,9 кПа, а також кількості ударів молота, відповідно й роботи для досягнення заданої щільності вугільного пирога у $1,15 \text{ т/м}^3$ на вологий стан шихти. З отриманих в результаті досліджень даних, можна також зробити висновок про те, що зі зниженням кількості ударів, та, як наслідок, прикладеної роботи трамбування, знижується трамбуваність вугільних шихт та їх щільність.

3.1.1. Вплив петрографічних характеристик шихт на роботу її трамбування

Детальний вплив петрографічних характеристик шихт на якість одержаного коксу можна знайти у працях [15]. Однак там досліджували лише вплив відбиття вітриніту на кінцеві характеристики коксу, не враховуючи параметри ущільнення, щільності та тиску розширення шихт.

З метою визначення впливу складу вугільних шихт на роботу їх трамбування нами були побудовані графічні залежності роботи затраченої для досягнення заданої щільності вугільного пирога від вмісту в шихті вугілля марок ДГ+Г (рис.4), від середнього довільного показника відбиття вітриніту шихт R₀ (рис. 5), від вмісту вітриніту V_t (рис. 6), від вмісту суми фіузенізованих

компонентів шихти ΣFC (7), а також показника летких речовин шихти V^{daf} (рис. 8).

Як можна побачити з представлених графіків, залежність роботи трамбування від вмісту в шихті вугілля марок ДГ+Г, вмісту суми пісних компонентів шихти

ΣFC , а також вмісту летких речовин шихти V^{daf} має зворотній характер, натомість від середнього довільного показника відбиття вітриніту шихт R_0 та вмісту вітриніту V_t – прямопропорційний.

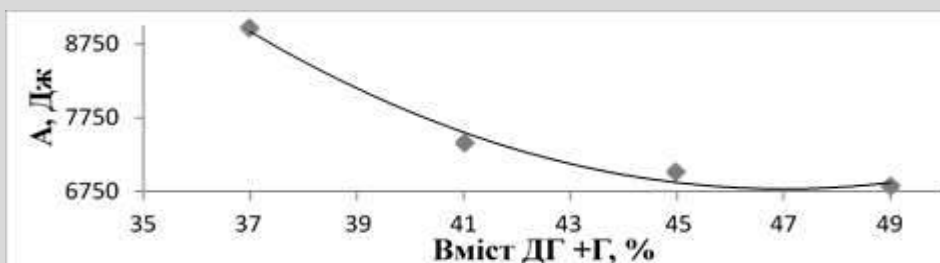


Рис. 4 Залежність роботи трамбування від вмісту в шихті вугілля марок ДГ+Г

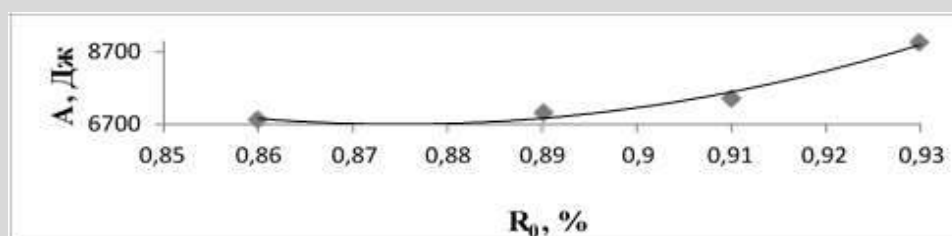


Рис. 5 Залежність роботи трамбування від середнього довільного показника відбиття вітриніту шихт R_0

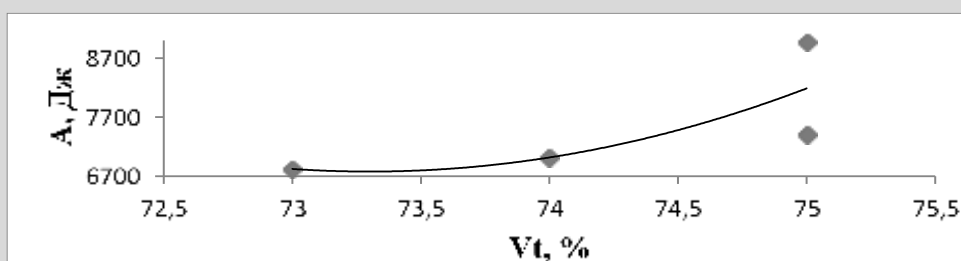


Рис. 6 Залежність роботи трамбування від вмісту вітриніту у шихті V_t

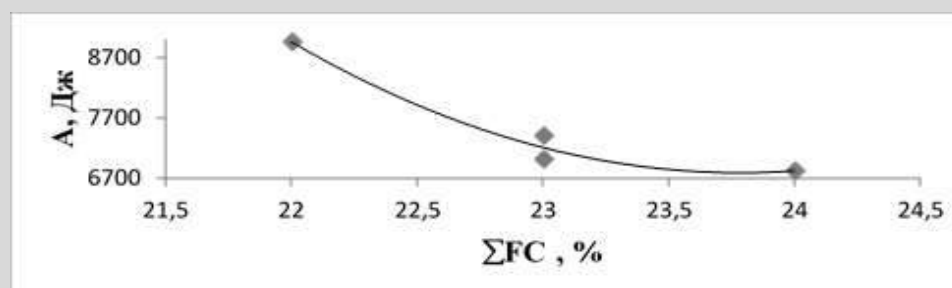
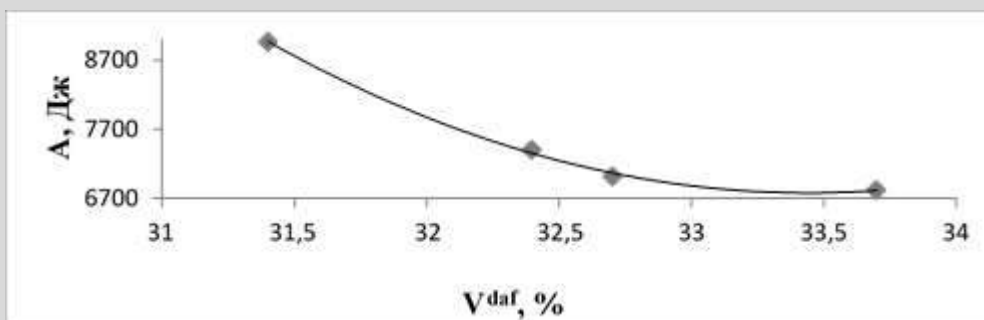


Рис. 7 Залежність роботи трамбування від вмісту суми фіузенізованих компонентів шихти ΣFC

Рис. 8 Залежність роботи трамбування від вмісту летких речовин шихти V^{daf}

3.1.2. Вплив ступеня помелу шихти на роботу трамбування

В лабораторних умовах нами були виконані додаткові дослідження для визначення впливу ступеня помелу шихти на час її трамбування. З цією метою шихта, яка відповідає марочно-компонентному складу шихти варіанту 3 (45 % вугілля марки ДГ + Г; 6 % вугілля марки Ж; 49 % вугілля марки К), послідовно додроблювалась до 88,0; 89,5; 90,5 і 92 % вмісту класу < 3 мм

(відповідно варіанти 3.1; 3.2; 3.3; 3.4 таблиць 10 і 11). В зазначених варіантах шихт визначали показники трамбованості (δ_{zz} , роботу трамбування). Методика проведення експерименту залишалась без змін.

На рис. 9 і 10 представлені графіки залежності роботи трамбування вугільних шихт для досягнення заданої щільності вугільного пирога від середнього діаметра частинок шихти d_s та вмісту класу < 3 мм в шихті.

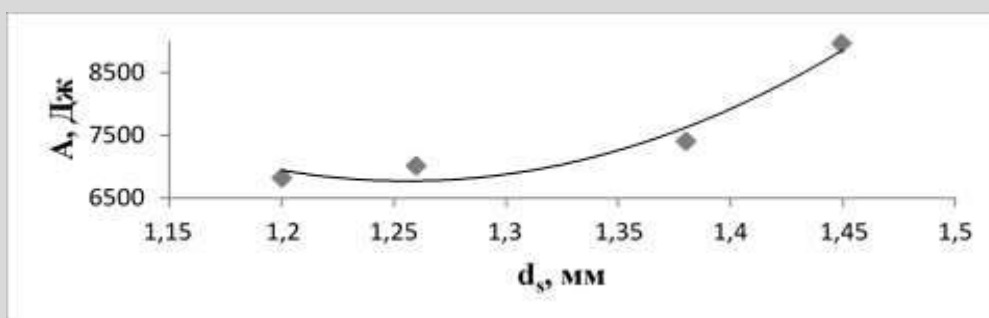
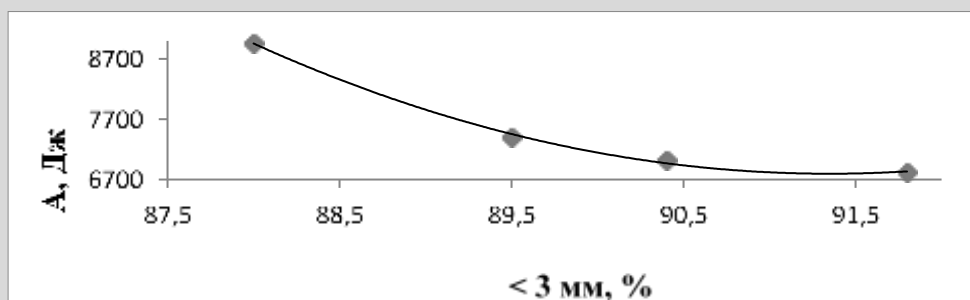
Рис. 9 Залежність роботи трамбування від середнього діаметра частинок шихти d_s 

Рис. 10 Залежність роботи трамбування від вмісту класу < 3 мм в шихті

Як можна побачити, зі зростанням ступеню помелу шихти, і, відповідно, зі зниженням середнього діаметра її частинок, робота трамбування вугільних шихт для

досягнення заданої щільності вугільного пирога знижується.

3.2. Вплив складу вугільних шихт на показники якості коксу

У табл.12 подано аналіз гранулометричного складу лабораторного коксу.

Аналіз даних табл. 12 свідчить про поступове зменшення крупних фракцій коксу від 1-го до 4-го варіанта за основними класами розміру, якими оцінюють промисловий металургійний кокс. Це цілком пояснюється

поступовим зменшенням вмісту вітриніту в шихтах – з 75 % до 73 %, індексу відбиття вітриніту – з 0,93 % до 0,86 %, а також зниженням здатності до спікання шихти ($C_{ш}$) – з 46,5 % до 36,6 % і коксувальності шихти ($K_{ш}$) – з 2,3 до 1,6 (див. табл. 9).

Отримані показники якості коксу наведені в табл. 13.

Таблиця 12

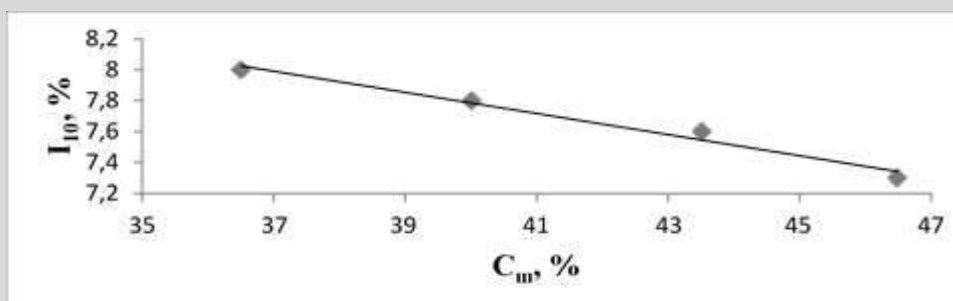
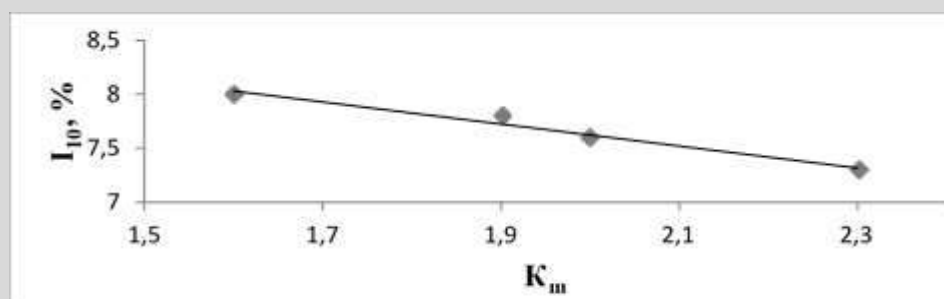
Гранулометричний склад лабораторного коксу

Варіант	Гранулометричний склад (мм), %						Середній діаметр, мм
	>80	60-80	40-60	25-40	10-25	<10	
1	40,0	34,2	13,8	1,8	3,5	6,7	72,3
2	37,7	33,6	18,0	0,8	2,9	7,0	71,5
3	39,6	34,3	13,0	1,3	3,4	8,4	71,3
4	38,2	32,5	15,7	1,8	3,0	8,8	70,2

Таблиця 13

Показники якості отриманого лабораторного коксу

Варіант	Технічний аналіз, %			Вихід, %	Механічна міцність, %		Реакційна здатність та післяреакційна міцність, %	
	A^d	S_t^d	V^{daf}	B_k	M_{25}	I_{10}	CRI	CSR
1	11,2	0,72	0,7	75,2	91,0	7,3	37,7	51
2	11,1	0,79	0,6	74,4	91,5	7,6	38,2	49
3	11,0	0,84	0,8	74,3	91,2	7,8	39,0	47
4	10,9	0,83	0,4	73,6	91,2	8,0	40,8	45

Рис. 11 Графік залежності показника стиранності коксу I_{10} від спікливості шихти $C_{ш}$.Рис. 12 Графік залежності показника стиранності коксу I_{10} від коксувальності шихти $K_{ш}$.

З отриманих даних можна побачити, що зі збільшенням в шихтах вмісту газового вугілля знижуються показники якості отриманого з них коксу та зменшується розмір фракцій коксу [16]. Так, не зважаючи на те, що показники механічної міцності досліджених коксів характеризуються близькими значеннями (91,0 – 91,5 %), стиранність коксів погіршилась від 7,3 % (1-й варіант) до 7,8 та 8,0 % у коксів 3-го та 4-го варіантів відповідно. Найгіршими показниками «гарячої» міцності також характеризуються кокси варіантів 3 (CRI=39,0 %, CSR=47 %) та 4 (CRI=40,8 %, CSR=45 %). Передбачувано зі збільшенням в шихтах вмісту газового вугілля поступово знижувався вихід коксу – від 75,2 % (1 варіант) до 73,6 % (4 варіант). Найгірший кокс ($I_{10} = 10,0$ %; CSR = 42,0 %) було отримано зі зразка найменш метаморфізованого вугілля (76,7 %) з $R_o = 0,97$ %. Найкращі показники ($I_{10} = 6,2$ %; CSR = 62,0 %) спостерігались при $S^{daf} = 89,9$ %; $R_o = 1,28$ %. Аналогічно, в іншому дослідженні [17] виявлено високу кореляцію між пока-

зниками відбиття вітриніту вихідного вугілля або суміші і технологічними характеристиками CRI та CSR коксу. Подальше підвищення механічних показників якості коксу до $I_{10} \geq 5,0$ % з низькометаморфізованого некоксового вугілля можливе лише за значно вищих значень міцності на стиск $\sigma_{33} \geq 30$ кПа, які вже досягаються під час брикетування вугілля та вимагають більших капіталовкладень [18].

На рис. 11 і 12 представлені графічні залежності показника стиранності коксу I_{10} відповідно від спікливості $C_{ш}$ та коксівності $K_{ш}$ шихти.

Дані графіки показують, що залежності $I_{10}=f(C_{ш})$ та $I_{10}=f(K_{ш})$ зворотні й носять лінійний характер.

3.3. Вплив складу вугільних шихт на вихід та якість хімічних продуктів коксування

В табл.14 наведено вихід основних хімічних продуктів коксування з дослідних вугільних шихт у 5-ти кг печі ДП «УХІН».

Таблиця 14

Вихід основних хімічних продуктів коксування

Варіант	Вихід хімічних продуктів коксування (d), %							
	Кокс	Смола	Сирий бензол	NH ₃	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O _{пар}	Газ за різницею
1	75,2	5,5	0,96	0,17	0,38	1,01	4,50	12,28
2	74,4	5,8	0,99	0,15	0,37	1,04	5,00	12,25
3	74,3	6,0	1,00	0,14	0,36	1,05	4,80	12,35
4	73,6	6,4	1,10	0,14	0,36	1,14	5,20	12,06

Отримані дані свідчать, що зі зростанням в дослідних шихтах вмісту вугілля марок ДГ+Г знижується вихід коксу, натомість зростає вихід сирого бензолу (з 0,96 до 1,10 %), та CO₂ (з 1,01 до 1,14 %).

З летких продуктів коксування 5-кг пічки було виділено суміші води і смоли, які утворили стійкі емульсії. Завдяки особливостям конструкції та умов коксування,

стійкість такої емульсії є звичайним явищем, незалежно від типу вугільних компонентів шихти.

Масову частку води визначили згідно ТУ У 19.1-00190443-100:2016 «Смола кам'яновугільна», масову частку речовини, що нерозчинні у хіноліні, визначали за ДСТУ 8389. Результати наведено у табл. 15.

Таблиця 15

Порівняльна характеристика зразків смол від коксування варіантів вугільних шихт №№ 1 - 4

Значення	Масова частка води, %	Масова частка речовин, що нерозчинні у хіноліні, %	
		при визначенні	у перерахунку на безводну смолу
Мінімальні	42,1	4,0	6,9*
Максимальні	42,5	5,4	9,3*
Середні	42,3	4,7	8,1*

*- значення для довідки

Отримані результати показують, що смоли, які утворені від коксування вугільних шихт мають однаково спорідненість к емульсуванню. Здатність до розшарування обводнених емульсій практично однакова.

Вміст речовин, нерозчинних у хіноліні, перераховувати на безводну смолу не доцільно, оскільки вміст води перевищує 10 %. Але одержані смоли відзначаються досить високим ступенем піролізованості, порівняно з промисловими зразками смоли від коксування

трамбованих шихт. Взагалі, при збереженні визначеного ступеню піролізованості у промислових зразках, одержані смоли будуть мати обмежений збут для виробництва електродного пеку.

Проба від коксування була проаналізована на солевміст, що характеризує вплив якості надсмольної води на процеси відстоювання смоли та експлуатації біохімічної установки очищення стічних вод.

Солевміст надсмольної води визначали кондуктометричним методом, водневий показник (pH) електрохімічним методом за допомогою скляного комбінованого електроду на мультипараметровому приладі. Вміст леткого аміаку визначили кислотно-основним титруванням. Результати наведено у табл.16.

Таблиця 16

Характеристика надсмольної води

Параметри	Значення
pH	9,16
Вміст леткого аміаку, г/дм ³	3,1
Електрична проводимість, мОм/см	20,4
Солевміст (у перерахунку на хлорид амонію), г/дм ³	8,93
У перерахунок на зв'язаний аміак, г/дм ³	2,8

Дані показують, що надсмольна вода має досить низький солевміст, невисокі значення зв'язаного аміаку, що не призведе до ускладнень у відділенні конденсації та на біохімічній установці по переробці стічних вод.

Висновки

На підставі виконаних досліджень, можна сформулювати наступне:

1. Результати досліджень підтверджують приналежність усіх вугільних концентратів заявленим маркам. Максимальними спікливими властивостями характеризується вугілля марки «Ж» Arch Coal Premium, яке має найвищу максимальну пластичність $F_{\max} - 40184 \text{ ddpm}$, найменшу початкову температуру розм'якшення – 349 °С, інтервал пластичності $\Delta T = 105 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Зі зростанням вмісту газового вугілля в шихтах з 37 до 49 % і зниженням вмісту вугілля марки «К» з 57 до 45 %, спостерігається поступове зниження трамбованості шихт з 22,5 до 21,1 кПа; тиску їх розпирання – з 6,8 до 5,9 кПа; а також роботи трамбування для досягнення заданої щільності вугільного пирога у 1,15 т/м³ на вологий стан шихти – з 8966 до 6822 Дж.

Робота та/або час трамбування, від вмісту в шихті вугілля марок ДГ+Г, вмісту суми пісних компонентів шихти ΣFC , а також вмісту легких речовин шихти V^{daf} має зворотній характер, натомість від середнього довільного показника відбиття вітриніту шихт R_0 та вмісту вітриніту V_t – прямопропорційний.

Зі зростанням ступеню помелу шихти, і, відповідно, зі зниженням середнього діаметра її частинок, робота трамбування вугільних шихт для досягнення заданої щільності вугільного пирога знижується з 7407 до 6238 Дж.

3. Збільшення в шихтах вмісту газового вугілля призводить до зниження показників якості отриманого з них коксу. Показники механічної міцності досліджених коксів характеризуються близькими значеннями (91,0 –

91,5 %), стиранисть коксів погіршилась від 7,3 % (1-й варіант) до 7,8 та 8,0 % у коксів 3-го та 4-го варіантів відповідно. Залежності $I_{10} = f(C_m)$ та $I_{10} = f(K_m)$ зворотні й носять лінійний характер. Найгіршими показниками «гарячої» міцності також характеризуються кокси варіантів III (CRI=39,0 %, CSR=47 %) та IV (CRI=40,8 %, CSR=45 %). Передбачувано зі збільшенням в шихтах вмісту газового вугілля поступово знижувався вихід коксу – від 75,2 % (1 варіант) до 73,6 % (4 варіант).

4. Зі зростанням в дослідних шихтах вмісту вугілля марок ДГ+Г знижується вихід коксу, натомість зростає вихід сирого бензолу (з 0,96 до 1,10 %), та CO₂ (з 1,01 до 1,14 %). Смоли, які утворені від коксування вугільних шихт мають однакову спорідненість до емульсування. Надсмольна вода має досить низький солевміст, невисокі значення зв'язаного аміаку, що не призведе до ускладнень у відділенні конденсації та на біохімічній установці по переробці стічних вод.

5. Виходячи з наявної сировинної бази підприємства на період воєнного часу в Україні, другий варіант з досліджених шихт вважаємо оптимальним для коксування у трамбованому вигляді, як з економічної точки зору, так і з точки зору якості отриманого коксу. Так, показники якості коксу із шихти 2-го варіанту, не дивлячись на її нижчу вартість, суттєво не відрізняються від показників коксу 1-го варіанту шихти. Натомість подальше збільшення вмісту вугілля марок ДГ+Г в шихті призводить до значного зниження показників якості з них коксу.

Бібліографічний список

1. Kosyrczyk L. Optimization of thermal parameters of the coke oven battery by modified methodology of temperature measurement in heating flues as the management tool in the cokemaking industry / L. Kosyrczyk, S. Stelmach, K.

- Gaska, A. Generowicz, N. Iwaszczuk, D. Kardaś** // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – P. 904. <https://doi.org/10.3390/en14040904>.
- 2. Ahmed H.** New trends in the application of carbon-bearing materials in blast furnace iron-making / **H. Ahmed** // *Minerals*. – 2018. – Vol. 8. – P. 561. <https://doi.org/10.3390/min8120561>.
- 3. Zhou D.** Production and development of large blast furnaces from 2011 to 2014 in China / **D. Zhou, S. Cheng, Y. Wang, X. Jiang** // *ISIJ International*. – 2015. – Vol. 55. – P. 2519–2524. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-353>.
- 4. Żarczyński P.** Studies on the possibility of extending coal resources for coke production through the application of coal predrying / **P. Żarczyński, A. Strugala** // *Energy & Fuels*. – 2018. – Vol. 32. – P. 5666–5676. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03473>.
- 5. Loison R.** *Coke. Quality and Production* / **R. Loison, P. Foch, A. Boyer**. – London: Butterworths, 1989. – 555 p.
- 6. Patrick J.W.** Macroporosity in cokes: Its significance, measurement, and control / **J.W. Patrick, A. Walker** // *Carbon*. – 1989. – Vol. 27. – P. 117–123. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(89\)90164-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(89)90164-4).
- 7. Karcz A.** Increasing chances of utilizing the domestic coking coal resources through technological operations in coal blend preparation / **A. Karcz, A. Strugala** // *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*. – 2008. – Vol. 24. – P. 5–18.
- 8. Duda A.** The economics of coking coal mining: A fossil fuel still needed for steel production / **A. Duda, G. Fidalgo Valverde** // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – P. 7682. <https://doi.org/10.3390/en14227682>.
- 9. European Commission.** Study on the EU's List of Critical Raw Materials, Factsheets on Critical Raw Materials. Final report. – Luxembourg: European Union, 2020. – Available online (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c0d5292a-ee54-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en>).
- 10. Mukina N.V.** Preparation of coal charge for coke battery complex № 5, 6 at coke production of PJSC «ArceLorMittal Kryvyi Rih» / **N.V. Mukina, O.P. Chernousova, D.V. Miroschnychenko, N.A. Desna, O.V. Sytnyk, V.V. Koval** // *Coal Chemistry Journal*. – 2021. – No. 3. – P. 8–20. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-3-8-20>.
- 11. Plachkov I.V.** *Energy: History, Present and Future. Book 1. From Fire and Water to Electricity* / **I.V. Plachkov, N.I. Dunaevskaya, V.S. Podgurenko, B.A. Shilyaev, Yu.A. Landau, I.Ya. Sygal, G.D. Danylko**. – Kyiv, 2012. – 589 p. Available online: (<http://energetika.in.ua/ru/books/book-1>).
- 12. Samoilik V.G.** *Classification of Solid Combustible Fossils and Methods of Their Research* / **V.G. Samoilik**. – Kharkiv: Vodnyi spektr GM, 2016. – 308 p.
- 13. Tlotleng M.T.** Coal Characteristics That Lead to Abrasion During Grinding / **M.T. Tlotleng**. – Johannesburg, 2011. – 131 p. Available online: (<https://core.ac.uk/download/pdf/39669435.pdf>).
- 14. Idris A.** Grindability and abrasive behavior of coal blends: analysis and prediction / **A. Idris, Z. Man, A. Bustam, N.E. Rabat, F. Uddin, H.A. Mannan** // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2022. – Vol. 42. – P. 1143–1169. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1694009>.
- 15. Pusz Sł.** Reflectance parameters of cokes in relation to their reactivity index (CRI) and the strength after reaction (CSR), from coals of the Upper Silesian Coal Basin, Poland / **Sł. Pusz, R. Buszko** // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2012. – Vol. 90–91. – P. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.10.008>.
- 16. Montiano M.G.** Effect of briquette composition and size on the quality of the resulting coke / **M.G. Montiano, E. Díaz-Faes, C. Barriocanal** // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – Vol. 148. – P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.039>.
- 17. Chen Y.** HRTEM analysis of carbon structure evolution during the formation of metallurgical coke and impacts on coke quality / **Y. Chen, A. Tahmasebi, S. Lee, J. Yu** // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2023. – Vol. 174. – P. 106124. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106124>.
- 18. Fehse F.** Influence of briquetting and coking parameters on the lump coke production using non-caking coals / **F. Fehse, K. Rosin, H.W. Schröder, R. Kim, M. Spöttle, J.U. Repke** // *Fuel*. – 2017. – Vol. 203. – P. 915–923. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.002>.

Рукопис надійшов до редакції 11.07.2025 р.

INFLUENCE OF COAL QUALITY AND ITS PREPARATION ON THE EFFICIENCY OF COAL CHARGE TAMPING AND COKE QUALITY

© D.V. Miroschnychenko¹, V.V. Koval², O.L. Borysenko³, L.P. Bannikov⁴

STATE ENTERPRISE 'UKRAINIAN STATE RESEARCH INSTITUTE FOR CARBOCHEMISTRY (UKHIN)', 61023, Kharkiv, 7 Vesnina St., Ukraine

N.V. Mukina⁵

PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih", 50095, Dnipropetrovsk Region, Kryvyi Rih, 1 Kryvorizhstali St., Ukraine

S.G. Nedbaylo⁶

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), 61002, Kharkiv, Kyrpichova St., 2, Ukraine

¹ *Miroshnychenko Denis Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Prof., Chief Researcher of Coal Department (CD), e-mail: dvmir79@gmail.com*

² *Koval Valentyn Valeriyovych, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher of CD, e-mail: kovalen79@gmail.com*

³ *Borysenko Oleksandr Lyudvikovych, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Acting Director, e-mail: zd@ukhin.org.ua*

⁴ *Bannikov Leonid Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Chemical Department, e-mail: ukhinbannikov@gmail.com*

⁵ *Mukina Natalia Volodymyrivna, Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Technical Department of Production Management of the Coke-Chemical Plant, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com*

⁶ *Nedbaylo Serhiy Gennadiyovych, postgraduate student of the Department of Technologies of Oil, Gas and Solid Fuel Processing*

The paper presents the results of a study of real coal blends of different compositions intended for coking by charging into the chamber through stamping. The problem of ensuring high-quality blast furnace coke is one of the key issues for the steel industry, since coke performs energetic, chemical, and physical functions in the blast furnace process. Under wartime conditions, limited supply, and the high cost of high-quality coking coal, the optimization of coal blend composition and the improvement of its preparation technology acquire particular importance.

It was established that with an increase in the content of gas coal of a low degree of metamorphism and a corresponding decrease in the share of coal of a high degree of metamorphism, a gradual deterioration of coke quality indicators is observed. This is reflected in a reduction of coke yield (from 75.2 % to 73.6 %), an increase in abrasion (from 7.3 % to 8.0 %), as well as in the deterioration of "hot" strength (CRI up to 40.8 %, CSR down to 45 %). At the same time, the stampability of the blends decreases (from 22.5 to 21.1 kPa), the expansion pressure reduces (from 6.8 to 5.9 kPa), and the stamping work required to achieve the specified cake density decreases (from 8966 to 6822 J). It was also shown that the degree of blend grinding has a significant effect on energy consumption: with a decrease in the average particle size, the stamping work decreases from 7407 to 6238 J.

In addition, it was found that an increase in the content of DG+G coal grades leads to a higher yield of coking by-products, in particular crude benzene and CO₂, while the properties of tar and the satisfactory characteristics of ammoniacal liquor remain unchanged. This is important for the efficiency of subsequent treatment of condensates and wastewater.

The obtained results indicate that, under the existing limitations of the raw material base, the second variant of the coal blend composition is the most optimal. It ensures acceptable coke quality at a lower cost and can be recommended for industrial application. The practical significance of the study lies in determining the regularities of the influence of petrographic and granulometric characteristics of coal blends on the stamping process and coke properties, which provides a basis for improving the efficiency of steel production in Ukraine under the conditions of a shortage of high-quality coking coal.

Keywords: coal concentrates, coal blend, coal charge preparation, tamped coal cake, tamping work, strength of the tamped coal cake, coke quality.

Corresponding author: V.V. Koval, e-mail: kovalen79@gmail.com

Manuscript received 2025/07/11

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАЛУЧЕННЯ ВІТЧИЗНЯНОГО ВУГІЛЛЯ ЛЮБЕЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА У ШИХТИ ДґЮЧИХ КОКСОХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ. ПОВІДОМЛЕННЯ 2. ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ ПЛАСТА П7 ДІЛЯНКИ «ЛЮБЕЛЬСЬКА» №3 У КОКСІВНИХ ШИХТАХ АМКР: ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЯКОСТІ КОКСУ© В.В. Коваль¹, Д.В. Мірошніченко², О.Л. Борисенко³

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)» (ДП «УХІН»), 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

Н.В. Мукіна⁴

ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", 50095, Дніпропетровська обл., Кривий Ріг, вул. Криворіжсталі, 1, Україна

Б.Й. Покрасс⁵

CCI Lubelia, 80300, Жовква, Львівська обл., вул. Войнів УПА, 8 г, Україна

С.Г. Недбайло⁶

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна

¹ Коваль Валентин Валерійович, докт. філ. (Ph.D.), ст. наук. співр. вугільного відділу (ВВ), e-mail: kovalen79@gmail.com² Мірошніченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., гол. наук. співр. вугільного відділу ВВ, e-mail: dymir79@gmail.com³ Борисенко Олександр Людвікович, канд. техн. наук, с.н.с., в.о. директора, e-mail: zd@ukhin.org.ua⁴ Мукіна Наталія Володимирівна, доктор філософії (Ph.D.), начальниця технічного відділу управління виробництвом КХВ, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com⁵ Покрасс Борис Йосипович, голова правління, e-mail: cci.lubelia@gmail.com⁶ Недбайло Сергій Геннадійович, аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: Serhii.Nedbailo@iht.khpi.edu.ua

Це дослідження є продовженням роботи, представленої в Повідомленні 1 [1], у якому було виконано комплексну петрографічну та технологічну оцінку вугілля пласта п7 ділянки №3 Любельського родовища Львівсько-Волинського басейну та доведено його високу коксівну цінність. У цій роботі розглянуто можливість широкого залучення цього вугілля до складу промислових шихт коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» для отримання високоякісного доменного коксу. На основі трьох варіантів гравітаційних та трьох трамбованих шихт, сформованих шляхом часткової або повної заміни імпортного та вітчизняного вугілля на вугілля ділянки №3, проведено комплексну оцінку їх гранулометричних, петрографічних та технологічних параметрів, а також визначено якісні характеристики отриманих лабораторних коксів. Зі зростанням частки вугілля Любельського родовища у шихтах спостерігається зниження зольності до 6,6 % (гравітаційні) та 7,5 % (трамбовані), а також збільшення товщини пластичного шару до 16 та 14 мм відповідно. Лабораторне коксування показало покращення показників реакційної здатності CRI та післяреакційної міцності CSR при заміщенні концентратів з високими значеннями індексу основності I_b вугіллям Elk Romeo Creek та Любельським вугіллям. Для гравітаційних шихт покращення CRI/CSR становило 3,6 % / 3,4 % (варіант 2) та 1,0 % / 0,5 % (варіант 3), а для трамбованих – 1,7 % / 4,2 % (варіант 2).

У варіанті з максимально можливим вмістом вугілля ділянки №3 (70 % марки К + 30 % Наїї марки Г) розрахунки прогнозують отримання коксу з $A^d \approx 6,0$ %, $S^d \approx 0,59$ %, $CRI \approx 31,0$ % та $CSR \approx 58,0$ %, що перевищує показники чинних шихт підприємства.

Отримані результати підтверджують технологічну ефективність та промислову доцільність широкого використання вугілля Любельського родовища як в складі гравітаційних, так і трамбованих шихт.

Ключові слова: Любельське вугільне родовище, склади вугільних шихт, трамбування, гравітаційне завантаження, якість коксу, реакційна здатність, післяреакційна міцність.

Автор для листування В.В. Коваль, e-mail: kovalen79@gmail.com

Вступ

Поточна робота є другою частиною циклу досліджень, присвячених обґрунтуванню промислового використання вітчизняного вугілля Любельського родовища у виробництві металургійного коксу. У Повідомленні 1 [1] було проведено детальний геолого-петрографічний, класифікаційний та технологічний аналіз вугілля пласта п7 ділянки №3, в результаті якого встановлено його низьку зольність (4,7 %), помірний вміст сірки (0,91 %), високий вміст вітриніту (72 %) та середній показник відбивної здатності вітриніту $R_o = 1,21$ %, що відповідає середньому ступеню метаморфізму. Було показано, що це вугілля має добрі пластично-в'язкі властивості ($Y = 17$ мм, $RI = 68$ од., $FSI = 8\frac{1}{2}$ од.), належить до марки К(К2) і класифікується за системою UNECE з кодом 12 0 21 8 24 04 09 36, що свідчить про його високу придатність до коксування без необхідності попереднього збагачення. За якісними показниками воно є конкурентоспроможним порівняно з вугіллям провідних зарубіжних басейнів [1-4].

У цій роботі (Повідомлення 2) основна увага приділена практичній оцінці ефективності використання вугілля пласта п7 ділянки №3 у складі реальних промислових шихт ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Дослідження включало аналіз базових гравітаційних та трамбованих шихт підприємства, формування нових експериментальних варіантів із частковим та повним залученням Любельського вугілля та оцінку їх впливу на якісні характеристики отриманого коксу. Враховуючи, що технологія трамбування на сучасних коксових батареях має низьку специфічних конструктивних обмежень, пов'язаних зі стабільністю трамбованого пирога [29-32], особливу увагу було приділено можливості збереження стабільності структури трамбованої шихти при збільшенні частки Любельського вугілля та визначенню оптимальних співвідношень у складі сумішей.

Метою цієї роботи є визначення впливу часткового та повного заміщення окремих компонентів вихідних шихт ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» вугіллям пласта п7 ділянки №3 Любельського родовища на основні технологічні показники шихт і якісні характеристики отриманого коксу як при гравітаційному, так і при трамбованому способах завантаження.

1. Дослідження вихідних шихт АМКР та формування дослідних шихт із залученням вугілля пласта п7 ділянки «Любельська» № 3

На підставі раніше отриманих результатів щодо характеристик вугілля пласта п7 ділянки №3 шахти «Любельська» можна стверджувати, що це вугілля є високоефективним для переробки як компоненту коксівних шихт з метою отримання високоякісного металургійного коксу [5, 6]. Для перевірки доцільності використання коксівного вугілля шахти «Любельська», пласт п7, як компонента у насипних і трамбованих вугільних шихтах з подальшою оцінкою якості отриманого коксу було запропоновано три варіанти насипної шихти та три варіанти трамбованої шихти для підготовки та подальшого коксування (табл. 1). Вони були розроблені на основі нашого досвіду [7] і напрацьовані провідних дослідників у сфері складання шихт [8, 9].

Слід зазначити, що варіанти 1 (базові) як насипної, так і трамбованої шихт є чинними виробничими шихтами на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» і не містять вугілля шахти «Любельська». Натомість другі варіанти варіанти містять 20 % вугілля шахти «Любельська» – шихта гравітаційного завантаження та 10 % – трамбованого. У третьому варіанті вугілля ЗФ «Свято-Варваринська» було повністю замінено на вугілля шахти «Любельська», внаслідок чого його вміст у насипній шихті збільшився до 55 %, а в трамбованій – до 43 %.

Крім того, у другому і третьому варіантах для забезпечення якості коксу було вилучено концентрати з високими показниками основності (Arch Premium – 4,15; Colombian (Excomin) – 2,21; CSM – 2,93; CSM II – 3,84). %. Також в 2-му та 3-му варіантах з тією ж метою ми зменшували вміст вугілля ДП «Павлоградвугілля», натомість, підвищували вміст вугілля Elk Romeo Creek, яке характеризується найнижчим (1,58) індексом основності з представленого.

Технологічні властивості, петрографічна характеристика вугільних шихт, які були використані для проведення лабораторних коксувань, а також їх фактичний гранулометричний склад наведені в табл. 2 – 4.

Проаналізувавши представлені дані, можна зробити висновок, що отримані значення технологічних властивостей досліджених вугільних шихт, змінюються у відповідності до зміни їх марочного складу. Враховуючи, що зольність вугілля шахти «Любельська», пласт п7 є найменшою (4,7 %) з усіх компонентів, зольність шихт зі зростанням в них вмісту цього вугілля, закономірно знижується – з 8,7 до 6,6 % в шихтах гравітаційного завантаження, та з 8,1

до 7,5 % в шихтах трамбованого завантаження. Вміст сірки шихт гравітаційного завантаження лежить в межах 0,71–0,94 %, а вихід летких речовин – 29,4–31,1 %; відповідно в шихтах трамбованого завантаження 0,70–0,95 % та 30,5–31,6%. Окремо слід відзначити позитивний вплив вугілля шахти «Любельська» на показник

товщини пластичного шару досліджених шихт: в шихтах гравітаційного завантаження Y зростає від 13 до 16 мм, а в шихтах трамбованого завантаження – від 13 до 14 мм. Це своєю чергою, має позитивно позначитись на якості отриманого коксу в першу чергу за показниками M_{25} і M_{10} .

Таблиця 1

Марочний і компонентний склади вугільних шихт

Постачальник	Марка	Марочний склад шихти, %					
		Гравітаційне завантаження (3-4 к/б)			Трамбоване завантаження (5-6 к/б)		
		Варіант 1 (баз.)	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 1 (баз.)	Варіант 2	Варіант 3
ДП «Павлоградвугілля»	ДГ	19	15	10	37	37	35
Arch Premium	Ж	4	0	0	3	0	0
Elk Romeo Creek	Ж	8	30	35	5	8	10
ЗФ «Свято-Варваринська»	К(К1)	40	25	0	33	33	0
Colombian (Excomin)	Не маркується	6	0	0	6	0	0
Шлавага	К(К1)	10	10	0	6	12	12
CSM	К(К1)	8	0	0	5	0	0
Ділянка «Любельська» №3, пласт п7	К(К2)	0	20	55	0	10	43
CSM II	К(К2)	5	0	0	5	0	0
Разом		100	100	100	100	100	100

Таблиця 2

Технологічні властивості дослідних вугільних шихт

Варіант; вміст (%) вугілля ділянки «Любельська №3», пласт п7	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм		Тиск розпирання, кПа	
	Wa	Ad	Sdt	Vdaf	X	Y	P _H	P ₁₀
Насипна								
1; 0	1,2	8,7	0,71	30,9	30	13	5,8	-
2; 20	1,5	7,6	0,84	31,1	38	15	5,1	-
3; 55	2,1	6,6	0,94	29,4	32	16	4,2	-
Трамбована								
1; 0	1,4	8,1	0,70	31,4	35	13	-	5,9
2; 20	1,9	8,0	0,76	31,6	45	13	-	5,0
3; 55	2,7	7,5	0,95	30,5	36	14	-	4,8

Зростання товщини пластичного шару для варіантів дослідних трамбованих шихт менше (1 мм), порівняно з варіантами дослідних шихт гравітаційного завантаження (3 мм). Проте товщина пластичного шару в дослідних трамбованих шихтах має менше значення, адже, як відомо, використання технології трамбування дозволяє

очікувати отримання доменного коксу більш високої якості за показниками механічної міцності, в першу чергу за рахунок можливості досягання значно більшої щільності завантаження [10, 11]. В нашому випадку – 1115 кг/м³ (на вологий стан), порівняно з 790 кг/м³ при системі верхнього завантаження [12, 13].

Таблиця 3

Петрографічна характеристика дослідних вугільних шихт

Варіант; вміст (%) вугілля ділянки «Любельська №3», пласт п7	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %					
							0,50-0,79	0,80-0,89	0,90-1,19	1,20-1,49	1,50-1,69	
	Vt	Sv	I	L	ΣFC		R ₀	Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту				
							ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС	
Насипна												
1; 0	77	1	19	3	19	1,04	17	7	55	20	1	
2; 20	76	1	21	2	25	1,04	15	13	52	20	0	
3; 55	74	1	22	3	23	1,06	10	14	43	33	0	
Трамбована												
1; 0	76	0	21	3	21	1,01	32	3	44	20	1	
2; 20	74	1	22	3	23	0,97	33	6	43	18	0	
3; 55	70	1	27	2	26	0,96	30	8	39	22	1	

Таблиця 4

Гранулометричний склад дослідних вугільних шихт

Варіант; вміст (%) вугілля ділянки «Любельська №3», пласт п7	Гранулометричний склад (мм), %						Середній діаметр частинок, мм
	>6	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3	
Насипна							
1; 0	4,2	15,6	29,3	16,4	34,5	80,2	1,90
2; 20	2,4	17,5	27,9	15,9	36,3	80,1	1,78
3; 55	2,4	17,7	28,2	16,1	35,5	79,8	1,80
Трамбована							
1; 0	0	8,4	25,1	21,7	44,8	91,6	1,15
2; 20	0,0	8,2	31,6	18,4	41,8	91,8	1,25
3; 55	0,0	8,2	31,4	18,2	41,5	91,2	1,24

Тиск розпирання всіх складених шихт не перевищує 6,0 кПа і залишається в межах допустимих технологічних норм.

Що стосується петрографічної характеристики, то суттєвої зміни середнього довільного показника відбиття вітриніту R_0 не спостерігалось. Діапазон його значень для шихт гравітаційного та трамбованого завантаження складав 1,04–1,06 % та 0,96–1,01 % відповідно.

Оцінюючи фактичний гранулометричний склад підготовлених до коксування шихт, можна відзначити, що ступінь їх помелів є близькими до заданих (80,0 % для гравітаційного та 91,5 % для трамбованого завантаження) та не перевищує нормованих відхилень $\pm 1,0$ %. У випадку підготовки шихт гравітаційного завантаження

відхилення рівня помелу складало від $-0,2$ до $+0,2$ %, а для трамбованих шихт від $-0,3$ до $+0,3$ %.

2. Аналіз якісних характеристик отриманого коксу

Три варіанти насипних вугільних шихт (включно з базовою) та три варіанти трамбованих шихт (включно з базовою), аналіз яких детально наведено в попередньому розділі, були прококовані у лабораторній коксовій печі конструкції ДП «УХІН» відповідно до методики, описаної нами раніше в [14].

У табл. 5 наведені показники якості отриманого коксу з досліджених вугільних шихт.

Таблиця 5

Показники якості отриманого коксу

Варіант; вміст (%) вугілля ділянки «Любельська №3», пласт п7	Технічний аналіз, %			Вихід коксу, %	Механічна міцність лабораторного коксу, %				Реакційна здатність та післяреакційна міцність, %	
					Лабораторні значення		Прогнозовані промислові значення			
	A^d	S^d_t	V^{daf}	B_k	P_{25}	I_{10}	M_{25}	M_{10}	CRI	CSR
Насипна										
1; 0	11,2	0,56	0,8	74,7	93,0	6,2	90,0	7,7	37,7	49,8
2; 20	9,8	0,61	0,8	75,4	91,9	7,4	88,9	8,9	34,1	53,2
3; 55	8,5	0,74	0,6	75,6	92,8	6,2	89,8	7,7	33,1	53,7
Трамбована										
1; 0	11,2	0,59	1,0	73,7	92,3	6,8	89,3	8,3	40,0	44,3
2; 10	10,4	0,70	0,9	74,1	91,7	7,6	88,7	9,1	38,3	48,5
3; 43	9,8	0,75	0,9	74,2	92,2	6,5	89,2	8,0	38,3	48,7

З представлених даних можна побачити наступний вплив додавання вугілля шахти «Любельська» на показники якості отриманих коксів:

1. Дані технічного аналізу – зольність коксів A^d знижується, як у випадку гравітаційного, так і трамбованого завантаження шихт зі збільшенням в них вмісту вугілля шахти «Любельська». Показник виходу летких речовин коксів V^{daf} не залежить від складу шихт, натомість його значення ($\leq 1,0$ %) підтверджує повноту процесу коксування.

2. Вихід коксів змінюється в діапазоні від 74,7 до 75,6 % для гравітаційних і від 73,7 до 74,2 % для трамбовувальних шихт, демонструючи обернену кореляцію з виходом летких речовин відповідних шихт.

3. Показники реакційної здатності CRI та післяреакційної міцності CSR коксів мають пряму залежність від індексу основності досліджуваних шихт. Враховуючи це, при складанні шихт 2-го та 3-го варіантів, ми відмовились від використання концентратів з високими індексами основності, натомість, разом зі зростанням вугілля шахти «Любельська», підвищували вміст вугілля Elk Romeo Creek марки Ж, яке характеризується найнижчим індексом основності. Як наслідок, ми спостерігаємо, покращення (зниження) показника CRI та зростання показника CSR . У випадку гравітаційного завантаження при переході від 1-го до 2-го варіанту відповідно на 3,6 % та на 3,4 %, а при переході від 2-го до 3-го варіанту відповідно на 1,0 % та 0,5 %. Аналогічну тенденцію спостерігаємо і у випадку трамбованого завантаження шихти – при переході від 1-го до 2-го варіанту покращення CRI на 1,7 % та CSR на 4,2 %. При переході від 2-го до 3-го варіанту зміни CSR не відбулося, а CSR покращився на 0,2 %.

4. Що стосується показників механічної міцності отриманих лабораторних коксів, як при гравітаційному завантаженні, так і в випадку трамбованого заванта-

ження, у другому варіанті спостерігається зниження механічної міцності P_{25} на 1,1 % і 0,6 % та зростання стиранності коксів I_{10} на 1,2 % і 0,8 % порівняно з базовим для гравітаційного та трамбованого завантаження відповідно. Натомість при подальшому збільшенні вмісту вугілля шахти «Любельська» в шихтах 3-го варіанту (до 55 % для гравітаційного та до 43 % для трамбованого завантаження) дані показники вирівнюються до початкових (базових) значень. Подібна динаміка, на нашу думку пов'язана з тим що у гравітаційній та трамбовувальній шихтах від 1-го до 3-го варіантів відбувається зниження вмісту мацералів вітриніту на фоні зростання вмісту інертиніту. Таким чином зростання петрографічної неоднорідності вугільних шихт 2-го варіанту, призводить до погіршення механічної міцності коксу [15]. Натомість збільшення вмісту вугілля шахти «Любельська» в шихтах 3-го варіантів призвело до подальшого зростання товщини пластичного шару, який в процесі термічної деструкції має здатність утворювати значну кількість термостійких рідкорухомих продуктів та приймати максимальну кількість піснуватих присадок, що позитивно вплинуло на характеристики міцності коксів та дозволило компенсувати негативний вплив петрографічної неоднорідності та покращити показники механічної міцності [16, 17].

Отримані результати повністю узгоджуються з висновками [18], які, дослідивши дев'ять різних вугільних шихт, дійшли висновку, що збільшення вмісту вітриніту та зменшення інертиніту у шихті позитивно впливає на показники механічної міцності коксу, зокрема, M_{25} та M_{10} . Проте, на відміну від їхніх висновків, наші результати не підтверджують такого ж чіткого впливу зазначених мацералів на показники CRI та CSR . На нашу думку, параметри якості коксу CRI та CSR значно більше залежать від мінерального складу шихти, зокрема, від індексу основності.

Крім того, ми погоджуємось з висновками [19], які показали, що навіть при однаковому вмісті вітриніту й інертніту їхня реакційна здатність може суттєво відрізнятися, що призводить до різної якості отриманого коксу. Отже, для досягнення кращих результатів при вуглезмішуванні необхідно підтримувати оптимальний баланс між вітринітом, інертнітом та оксидами металів. Їхні результати також підтверджують нашу точку зору щодо ключової ролі пластичних властивостей вугілля – особливо у випадку вугілля родовища «Любельська», ділянка №3, пласт п₇. Це вугілля вирізняється низькою температурою початку розм'якшення (415 °С), широким діапазоном пластичності (79 °С), високою плинністю за Гізелером, індексом Рога 68 одиниць і товщиною пластичного шару 17 мм, що сприяє формуванню високоякісного металургійного коксу.

У своєму недавньому дослідженні [20] також показали, що завдяки ретельно спланованій стратегії вуглезмішування металургійна промисловість може вирішити проблему дефіциту коксівного вугілля і знизити залежність від дорогого імпортного вугілля з Австралії та Нової Зеландії. У їхньому дослідженні доведено, що при точному підборі складу шихти допустимо використовувати до 38 % вугілля нижчої якості (у нашому випадку – 35–37 % у трамбованих шихтах), що дозволяє замінити близько 50 % імпортного вугілля вітчизняним.

В іншому дослідженні [21] було запропоновано підхід до вирішення «трілеми» вартість–якість–доступність для досягнення економічної ефективності на підприємстві Tata Steel. Було доведено можливість застосування 50 – 60 % індійського середньококсівного вугілля у складі шихти, що співвідноситься з нашими

результатами, де частка вугілля шахти «Любельська» досягала 55 %.

Крім вищеописаних результатів з досліджених шихт, сформованих з сировинної бази КХВ ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» та рядового вугілля ділянки «Любельська» № 3, пласт п₇ нами була розглянута можливість складання шихти з максимально можливим вмістом вугілля шахти «Любельська» з використанням компонентів, які не входять до складу виробничих шихт КХВ ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг». З цією метою нами було розглянуто альтернативний варіант шихти гравітаційного завантаження зі вмістом вугілля марки К шахти «Любельська» – 70 % та вугілля марки Г – 30 %. В якості газового вугілля нами розглянуто Індонезійське вугілля Наїу, яке надходило на Українських ринку, із наступними характеристиками: вміст сірки $S^d_t = 0,82$ %; вихід летких речовин $V^{daf} = 42,4$ %; зольність $A^d = 5,2$; товщина пластичного шару $Y = 10$ мм; тиск розпирання $P_H = 4,2$ кПа; вміст вітриніту $V_t = 94$ %, середній довільний показник відбиття вітриніту $R_o = 0,69$ % ($R_{max} = 0,75$ Як бачимо, за класифікаційними параметрами дане вугілля повністю відповідає приналежності до марки Г. Крім того, індекс основності цього вугілля I_b складає 1,73, що в купі з вмістом вітриніту 94 % та наднизьким вмістом інертніту – 1 %, робить його чудовим компонентом шихти та дає підґрунтя очікувати високі показники механічної міцності та реакційної здатності коксів із шихт за його участі.

В табл. 6 та 7 наведені орієнтовні розрахункові значення технологічних властивостей та петрографічної характеристики запропонованої вугільної шихти.

Таблиця 6

Технологічні властивості вугільної шихти

Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Тиск розпирання, кПа
Ad	Sdt	Vdaf	X	Y	P _H
4,6	0,88	29,9	26	15	6,0

Таблиця 7

Петрографічна характеристика вугільної шихти

Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %				
						0,50-0,79	0,80-0,89	0,90-1,19	1,20-1,49	1,50-1,69
V _t	S _v	I	L	ΣFC	R _o	Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту				
79	1	19	2	20	1,00	ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС
						30	0	29	41	0

Дані технічного та петрографічного аналізів, підтверджують відповідність запропонованої альтернативної шихти основним промислово-технологічним вимогам.

В табл. 8 представлені орієнтовні розрахунки очікуваних показників якості коксу з альтернативної шихти гравітаційного завантаження.

Таблиця 8

Очікувані показники якості коксу

Технічний аналіз, %			Вихід коксу, %	Механічна міцність лабораторного коксу, %		Реакційна здатність та післяреакційна міцність, %	
A^d	S^d_r	V^{daf}	B_k	M_{25}	M_{10}	CRI	CSR
6,0	0,59	< 1	75,1	90,5	7,3	31,0	58,0

Із даних таблиці видно, що отриманий кокс за прогнозом перевершуватиме показники якості коксів, отриманих із шихт на основі вугільних концентратів КХВ ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг», і матиме зольність ~ 6,0 %; вміст сірки ~ 0,59 %; вихід ~ 75,1 %; показники механічної міцності M_{25} ~ 90,5 % та M_{10} ~ 7,3 %; реакційної здатності CRI ~ 31,0 % та післяреакційної міцності CSR ~ 58,0 %.

Таким чином, отримані розрахунки показують, що зі двокомпонентної шихти, що складається з 30% вугілля Наїу марки Г та 70 % вугілля шахти «Любельська» №3, пласт п7 марки К прогнозовано можна отримувати кокс високої якості, що задовольняє вимогам вітчизняних та закордонних металургійних підприємств, як за показниками механічної, так і післяреакційної міцності та реакційної здатності.

Висновки

Додавання вугілля шахти «Любельська» спричинило позитивний вплив на показник товщини пластичного шару досліджених шихт: в шихтах гравітаційного завантаження Y зростає від 13 до 16 мм, а в шихтах трамбованого завантаження – від 13 до 14 мм.

На якість отриманих коксів додавання вугілля шахти «Любельська» має наступний вплив:

– Зольність коксів A^d знижується, у випадку як гравітаційного, так і трамбованого завантаження шихт зі збільшенням в них вмісту вугілля шахти «Любельська».

– Показник M_{25} механічної міцності отриманих лабораторних коксів, як при гравітаційному завантаженні, так і в випадку завантаження трамбованої сировини, у другому варіанті знижується відповідно на 1,1 та 0,6 %, а показник стираності коксів I_{10} зростає на 1,2 та 0,8 % порівняно з базовим відповідно для гравітаційного та трамбованого завантаження. Натомість, при подальшому збільшенні вмісту вугілля шахти «Любельська» в шихтах 3-го варіанту (до 55 % для гравітаційного та до 43 % для трамбованого завантаження) дані показники вирівнюються до початкових (базових) значень. Подібна динаміка, на нашу думку пов'язана зі зростанням петрографічної неоднорідності вугільних шихт 2-го варіанту, що призводить до погіршення механічної міцності коксу. Натомість збільшення вмісту вугілля шахти «Любельська» в шихтах 3-х варіантів призвело до подальшого зростання товщини пластичного шару, котрий в процесі термічної деструкції має здатність утворювати значну кількість термостійких рідкорухомих продуктів та приймати максимальну кількість піснуватих присадок. Останнє позитивно вплинуло на характеристики міцності коксів, дозволило компенсувати негативний вплив петрографічної неоднорідності та покращити показники механічної міцності.

– Спостерігається стабільне покращення показників реакційної здатності та післяреакційної міцності (CRI та CSR): в гравітаційних шихтах при переході від 1-го до 3-го варіантів (загальне зниження CRI на 4,6 % та зростання CSR на 3,9 %). У трамбованих шихтах тенденція аналогічна: найбільше покращення відзначено при переході до 2-го варіанту.

Отримані розрахунки показують, що з альтернативної двокомпонентної шихти, що складається з 30 % вугілля Наїу марки Г та 70 % вугілля шахти «Любельська» №3 пласту п7 марки К, прогнозовано можна отримувати кокс високої якості, котрий задовольняє вимогам вітчизняних та закордонних металургійних підприємств за показниками як механічної, так і післяреакційної міцності та реакційної здатності (зольність ~ 6,0 %; вміст сірки ~ 0,59 %; вихід ~ 75,1 %; показники механічної міцності M_{25} ~ 90,5 % та M_{10} ~ 7,2 %; реакційної здатності CRI ~ 31,0 % та післяреакційної міцності CSR ~ 58,0 %).

Результати досліджень підтверджують доцільність і ефективність промислового використання вугілля шахти «Любельська» як перспективного компонента для виробництва високоякісного металургійного коксу та як ресурсу, що зменшує залежність від вартісного імпортного коксівного вугілля.

Бібліографічний список

1. Мірошніченко Д.В. Обґрунтування залучення вітчизняного вугілля любельського родовища у шихти діючих коксохімічних підприємств України. Повідомлення 1. Дослідження якості вугілля пласта п7 ділянки «Любельська» № 3 та вугільних концентратів / Д.В. Мірошніченко, В.В. Коваль, І.В. Бучинська, О.Л. Борисенко, Н.В. Мукіна, Б.Й. Покрасс, Б. Бідолєнко, В.Д. Григор'єва // Вуглехімічний журнал. – 2025. – № 5. – С. 12–26. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2025-0-5-12-26>.

2. Узіюк В. Порівняльна характеристика складу, технологічних властивостей, якості і напрямів використання вугілля Львівсько-Волинського і Донецького басейнів / В. Узіюк, І. Шайнога, В. Лазар, А. Локтєв //

Вісник Львівського університету. Серія геологічна. – 2024. – Вип. 38. <https://doi.org/10.30970/vgl.38.09>

3. **Buchynska I.** Gas-coal fields of the Lviv-Volyn Coal Basin / **I. Buchynska, M. Matrofiaylo** // *Geology, Geochemistry of Combustible Minerals*. – 2024. – № 3–4. – P. 62–72. <https://doi.org/10.15407/ggcm2024.195-196.062>

4. **Бучинська І.В.** Комплексне освоєння супутніх корисних копалин і компонентів вугілля Любелського родовища Львівсько-Волинського басейну / **І. Бучинська, М. Матрофайло, А. Побережський** // Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Геологія. – 2023. – Вип. 2 (101). – С. 62–67. <https://geology.bulletin.knu.ua/article/view/1096>

5. **Xing X.** Effect of coal properties on the strength of coke under simulated blast furnace conditions / **X. Xing, H. Rogers, P. Zulli, K. Hockings, O. Ostrovski** // *Fuel*. – 2019. – Vol. 237. – P. 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.069>

6. **Zhang Q.** Prediction of coke quality at Baosteel / **Q. Zhang, X. Wu, A. Feng, M. Shi** // *Fuel Processing Technology*. – 2004. – Vol. 86 (1). – P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/S0378-3820%2803%2900058-4>

7. **Miroshnichenko D.** Effect of coal quality and preparation on the stamping performance and quality of coke / **D. Miroshnichenko, V. Koval, O. Borisenko, N. Mukina, I. Avdeyuk** // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – Art. 78352. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78352-z>

8. **Duffy J.J.** Understanding the mechanisms behind coking pressure: Relationship to pore structure / **J.J. Duffy, M. Castro Díaz, C.E. Snape, K.M. Steel, M.R. Mahoney** // *Fuel*. – 2007. – Vol. 86 (14). – P. 2167–2178. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.040>

9. **Meng F.** Characterization of microstructure and strength of coke particles and their dependence on coal properties / **F. Meng, S. Gupta, D. French, P. Koshy, C. Sorrell, Y. Shen** // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 320. – P. 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.046>

10. **Bai J.** Effect of bulk density of coking coal on swelling pressure / **J. Bai, C. Yang, Z. Zhao, X. Zhong, Y. Zhang, J. Xu, B. Xi, H. Liu** // *Journal of Environmental Sciences*. – 2013. – Vol. 25 (Suppl. 1). – P. S205–S209. <https://doi.org/10.1016/S1001-0742%2814%2960657-4>

11. **Miroshnichenko D.** Transfer of operating battery to loading with stamped charge / **D. Miroshnichenko, V. Koval, S. Kravchenko, M. Soloviev, A. Kogtin, S. Abdulin, O. Grankin** // *Petroleum & Coal*. – 2024. – Vol. 66 (2). – P. 527–536. https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/2024/04/PC-X_Miroshnichenko_2023_148.pdf

12. **Janta F.** Experience in determining the functional dependence of coke quality indicators on the method of filling coke chambers and density / **F. Janta** // *Koks Smola Gaz*. – 1965. – № 10. – С. 225.

13. **Meng Q.** Achievements of cokemaking industry and their supports to iron and steel industry in China / **Q. Meng, Q. Wang** // *Proceedings of the 6th ICSTI, Rio de Janeiro, Brazil*. – 2012. – P. 520. <https://doi.org/10.5151/2594-357X-22128>

14. **Мірошніченко Д.В.** Вплив якості вугілля та його підготовки на ефективність трамбування шихти та якість коксу / **Д.В. Мірошніченко, В.В. Коваль, О.Л. Борисенко, Л.П. Банніков, Наталія Мукіна** // Вуглехімічний журнал. – 2025. – № 6. – С. 14–29. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2025-0-6-14-29>

15. **Shmeltser E.O.** On the influence of the quality of preparation of coal charges on the strength and macroscopic composition of coke / **E.O. Shmeltser, V.P. Lyaluk, V.P. Sokolova, I.A. Lyakhova, D.A. Kassim, M.V. Cormer** // *Mining Herald*. – 2015. – № 99. – P. 128–133.

16. **Ковальов Є.Т.** Оцінка придатності кам'яновугільної шихти для отримання доменного коксу заданої якості з використанням технології трамбування / **Є.Т. Ковальов, О.Б. Борисенко, І.В. Шульза, Н.А. Десна** // Вуглехімічний журнал. – 2021. – № 4. – С. 9–15. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-4-9-15>

17. **Мукіна Н.В.** Підготовка вугільної шихти до коксування в умовах коксових батарей №5, 6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» / **Н.В. Мукіна, О.П. Черноусова, Д.В. Мірошніченко, Н.А. Десна, О.В. Ситник, В.В. Коваль** // Вуглехімічний журнал. – 2021. – № 3. – С. 8–20. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-3-8-20>

18. **Kieush L.** Investigation into the effect of multi-component coal blends on properties of metallurgical coke via petrographic analysis under industrial conditions / **L. Kieush, A. Koveria, J. Schenk, K. Rysbekov, V. Lozynskiy, H. Zheng, A. Matayev** // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14 (16). – Art. 9947. <https://doi.org/10.3390/su14169947>

19. **Wang Y.** Study on relationships between coal microstructure and coke quality during coking process / **Y. Wang, Q. Zhou, Q. Zhao, S. Qu, Y. Zhang** // *Processes*. – 2023. – Vol. 11 (3). – Art. 724. <https://doi.org/10.3390/pr11030724>

20. **Kumari P.** Blending strategies of coals from diverse origins for efficient coke making / **P. Kumari, A.K. Singh** // *Journal of the Geological Society of India*. – 2025. – Vol. 101 (2). – P. 220–229. <https://doi.org/10.17491/jgsi/2025/174084>

21. **Tiwari H.P.** Potential use of high-ash Indian medium coking coal in stamp-charged cokemaking / **H.P. Tiwari, S.K. Haldar, A. Das, P. Mishra, A. Kumar, P. Khattri** // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2019. – Vol. 39 (2). – P. 101–111. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1305959>

Рукопис надійшов до редакції 11.07.2025 р.



JUSTIFICATION OF THE INCLUSION OF DOMESTIC COAL OF THE LUBELSKIE FIELD IN THE BOILERS OF OPERATING COKE-CHEMICAL ENTERPRISES OF UKRAINE. Report 2. USE OF COAL FROM SEAM P7 OF THE “LYUBELSKA” SITE No. 3 IN AMKR COKING BLENDS: FORMULATION AND QUALITY ASSESSMENT OF COKE© V.V. Koval¹, D.V. Miroshnychenko², O.L. Borysenko³

STATE ENTERPRISE ‘UKRAINIAN STATE RESEARCH INSTITUTE FOR CARBOCHEMISTRY (UKHIN)’, 61023, Kharkiv, 7 Vesnina St., Ukraine

N.V. Mukina⁴

PJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”, 50095, Dnipropetrovsk Region, Kryvyi Rih, 1 Kryvorizhstali St., Ukraine

B.Yo. Pokrass⁵

CCI Lubelia, 80300, Lviv Region, Zhovkva, 8 St. Voyniv UPA, Ukraine

S.G. Nedbailo⁶

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 61002, Kharkiv, Kyrpichova St., 2, Ukraine

¹ Koval Valentyn Valeriyovych, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, CD, e-mail: kovalen79@gmail.com² Miroshnychenko Denis Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Prof., Chief Researcher, Coal Department (CD), e-mail: dvmir79@gmail.com³ Borysenko Oleksandr Lyudvikovych, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Acting Director, e-mail: zd@ukhin.org.ua⁴ Mukina Natalia Volodymyrivna, Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Technical Department of Production Management of the Coke-Chemical Plant, e-mail: Natalia.Mukina@arcelormittal.com⁵ Pokrass Boris Yosypovych, Chairman of the Board, e-mail: cci.lubelia@gmail.com⁶ Nedbailo Serhii Gennadiyovych, postgraduate student of the Department of “Technologies of Oil, Gas and Solid Fuel Processing” of NTU “KhPI”, e-mail: Serhii.Nedbailo@ihti.khpi.edu.ua

This study is a continuation of the work presented in Report 1 [1], in which a comprehensive petrographic and technological assessment of coal from Seam n7 of Site No. 3 of the Lubelska deposit of the Lviv-Volyn Coal Basin was carried out, confirming its high coking value.

This paper examines the potential for extensive integration of this coal into industrial blends of the coking production at ArcelorMittal Kryvyi Rih (AMKR) to produce high-quality blast-furnace coke. Based on three variants of gravity-loaded and three stamped blends—formed by partial or full replacement of imported and domestic coals with coal from Site No. 3—a comprehensive evaluation was performed, including granulometric, petrographic, and technological parameters, as well as an assessment of the quality characteristics of the resulting laboratory cokes.

An increasing share of Lubelska coal in the blends leads to a decrease in ash content down to 6.6% (gravity) and 7.5% (stamped), and to an increase in plastic-layer thickness up to 16 mm and 14 mm, respectively. Laboratory coking revealed improvements in Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength after Reaction (CSR) when high-basicity coals were replaced with Elk Romeo Creek coal and Lubelska coal. For gravity blends, improvements in CRI/CSR reached 3.6%/3.4% (variant 2) and 1.0%/0.5% (variant 3), while for stamped blends the increase was 1.7%/4.2% (variant 2).

In the variant with the maximum feasible proportion of Site No. 3 coal (70% K-rank + 30% Haju G-rank), the projected coke quality indicators are $Ad \approx 6.0\%$, $Sdt \approx 0.59\%$, $CRI \approx 31.0\%$, and $CSR \approx 58.0\%$, surpassing the values of current operational blends.

The results confirm both the technological efficiency and industrial feasibility of extensive use of coal from the Lubelska deposit in gravity-loaded and stamped blends.

Keywords: Lubelska coal deposit, coal blend composition, stamping, gravity charging, coke quality, coke reactivity and post-reaction strength.

Corresponding author: V.V. Koval, e-mail: kovalen79@gmail.com

Manuscript received 2025/07/11

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАЯВНИХ УСТАНОВОК СУХОГО ГАСІННЯ КОКСУ КОНСТРУКЦІЇ ДП «ГИПРОКОКС» ПРИ ПРОВЕДЕННІ РЕКОНСТРУКЦІЇ, МОДЕРНІЗАЦІЇ© С.О. Кравченко¹, А.А. Когтін²*ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ ПО ПРОЕКТУВАННЮ ПІДПРИЄМСТВ КОКСОХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ» (ДП «ГИПРОКОКС»), 61002, м. Харків, вул. Сумська 60, Україна*¹ Кравченко Сергій Олександрович, канд. техн. наук, в.о. директора – головний інженер, e-mail: sa.kravchenko@giprokoks.com² Когтін Артем Анатолійович, головний інженер проекту, e-mail: kogtin.giprokoks@gmail.com

Статтю присвячено практичному вирішенню проблем підвищення ефективності, продуктивності та екологічної безпеки наявних установок сухого гасіння коксу (УСГК) конструкції ДП «ГИПРОКОКС». Через конструктивні причини (потужність котла-утилізатора та димососа, обмеження по температурі циркулюючого газу перед котлом-утилізатором, розмір форкамери, конструкція кільцевого каналу, просторові обмеження тощо) деякі установки у роботі не можуть бути (при мінімальних капіталовкладеннях) повністю переведені на режим роботи з низьким вмістом горючих компонентів в циркулюючому газі. Робота таких блоків на режимах з низьким вмістом горючих компонентів не забезпечить досягнення проектної потужності з гасіння коксу. Також особливості конструкції не дозволяють ефективно реалізувати деякі рішення, притаманні сучасним моноблочним установкам. У статті показані можливі шляхи інтенсифікації процесу сухого гасіння коксу, підвищення енергоефективності та зменшення викидів (СО).

Зокрема показано, що інтенсифікація теплообміну в камері гасіння завдяки збільшенню температурного напору досягається зменшенням температури циркулюючих газів що надходять у камеру. Для цього на ділянці газового тракту між димососом і камерою встановлюється додатковий теплообмінник (субекономайзер). Наведено приклад, що демонструє ефективність такого технологічного рішення.

Висвітлені переваги використання надлишкового циркулюючого газу шляхом застосування технології утилізації на базі котла-утилізатора, що надає можливість підвищити енергоефективність УСГК на 9,7 %. Водночас забезпечується значне зниження викидів забруднюючих речовин (зокрема СО). Показано напрямки підвищення ефективності УСГК за рахунок зниження угару коксу і підвищення його якісних показників, що впливають на витрати у доменному процесі.

Наведено перелік елементів та обладнання, які використовуються на сучасних установках великої потужності провідних світових компаній.

Ключові слова: сухе гасіння коксу, котел-утилізатор, циркулюючий газ, надлишок, утилізація, вміст СО, угар, якість коксу, енергоефективність, підвищення продуктивності з гасіння коксу.

Автор для листування А.А. Когтін, e-mail: kogtin.giprokoks@gmail.com

Позитивні результати роботи установок сухого гасіння коксу (УСГК) стали основою для широкого застосування цієї технології як основного способу гасіння коксу.

За наших часів визначилася стала тенденція щодо будівництва моноблочних УСГК великої потужності, робота яких передбачається з режимом максимального спалювання горючих компонентів в циркулюючому газі (СО до 1,42÷1,5 %) тим самим досягається більший питомий видобуток пари енергетичних параметрів (більш ніж 0,55 т пари на тону погашеного коксу). Цей пар спрямовується переважно для видобутку електричної енергії. Показники питомого вироблення електричної енергії на таких установках досягають 150÷165 кВт год на 1 тону погашеного коксу. Таким способом досягається значне підвищення енергоефективності таких УСГК.

Так компанія «Nippon Steel Engineering CO., LTD» завдяки багатьом технічним досягненням, які переважно кореспондуються з рішеннями, наведеними в матеріалах [1], розробили найпотужнішу у світі УСГК продуктивністю 280 т/год у 2009 році. Як зазначено в матеріалах [2], великомасштабні УСГК мають такі переваги, як різке зниження вартості будівництва та поточних витрат, що доводить його високий внесок в інвестиційний ефект клієнтів.

Основні конструктивні вдосконалення наступні:



– для отримання відповідного розподілу (вирівнювання гранулометричного розподілу) частинок коксу за розмірами у радіальному напрямку використовується спеціальний завантажувальний пристрій (з використанням розсічника по типу такого, який застосовується на доменних печах);

– для забезпечення рівномірного розподілу частинок за розмірами в окружному напрямку використовується вагон, що обертається;

– для додаткового охолодження циркуляційних газів перед камерою гасіння встановлюється додатковий теплообмінник (суб-економайзер). Це забезпечує інтенсифікацію теплообміну в камері гасіння завдяки збільшенню температурного напору. Температура циркулюючих газів на вході в суб-економайзер становить 150-180 °С, на виході – 130 °С;

– спеціальний розвантажувальний пристрій, що забезпечує рівномірне розвантаження коксу та запобігає втраті циркулюючого газу (забезпечує газову щільність);

– дуттьовий пристрій спеціальної форми, що забезпечує рівномірний розподіл циркулюючого газу по камері гасіння та рівномірну швидкість спуску коксу в окружному напрямку;

– двійний канал косоного ходу – використовується для виключення псевдозрідження коксу та його виносу в

кільцевий канал камери гасіння та далі по елементам і газоходах блоку УСГК. Що сумісно з іншими рішеннями забезпечує зниження абразивного пошкодження вогнетривкої кладки камери;

– для підвищення уловлення коксового пилу розробляється спеціальна конструкція пилоосаджувального бункера. Це дозволяє знизити абразивний знос поверхонь нагрівання котла-утилізатора.

Проте в світі продовжують працювати багато наявних установок (потужність блоків від 50 до 70 т/год) за класичною концепцією (з високим вмістом горючих компонентів в циркулюючому газі: СО до 12 %).

Лише за проектами ГИПРОКОКСу за період з 1965 р. і дотепер було побудовано 34 установки сухого гасіння загальною кількістю 147 блоків [3]. І це з огляду на установки, які були побудовані іноземними компаніями за ліцензіями ГИПРОКОКСу. В Україні частину цих блоків було виведено з експлуатації по внутрішнім причинам підприємств (КХВ ПАТ «АМКР»). Установки побудовані на Донбасі або знаходяться на тимчасово окупованих територіях (Алчевський КХЗ) або зруйновані (Авдіївський КХЗ) внаслідок збройної агресії РФ. Але, все ж таки, в наш час більшість блоків, побудованих за проектами ГИПРОКОКСу, продовжують знаходитися в експлуатації та додатково модернізуються. Також проектується і будуються нові установки в Індії.

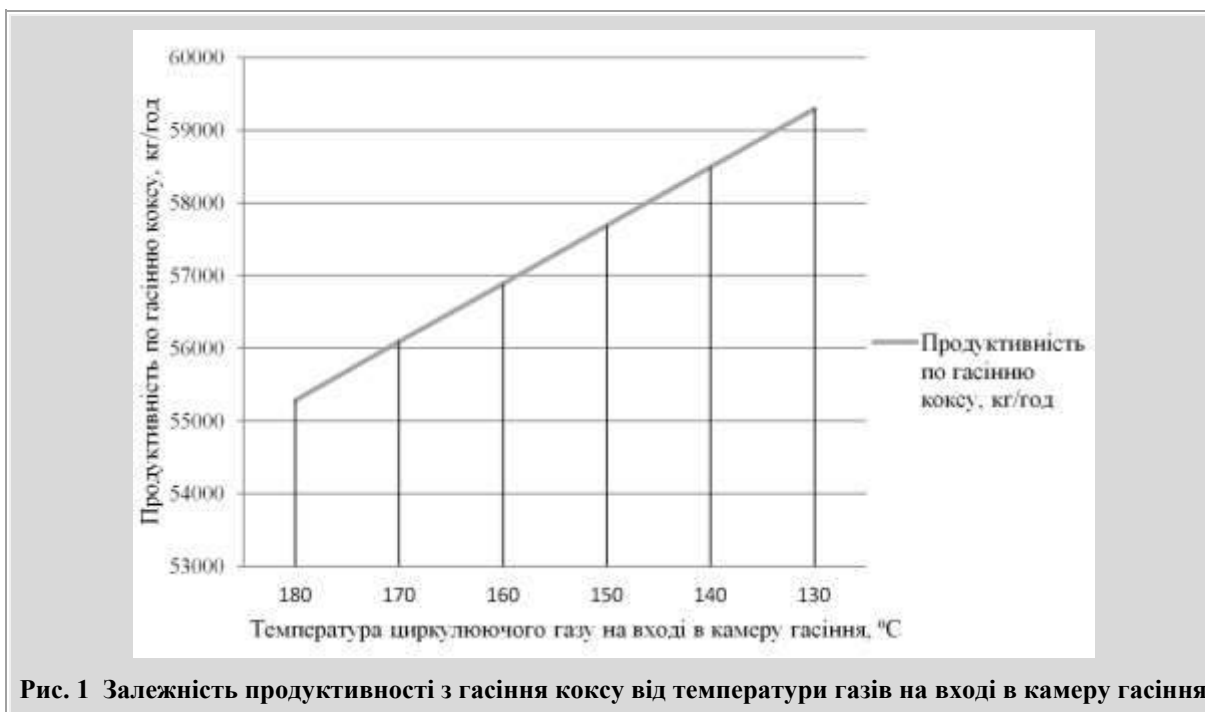


Рис. 1 Залежність продуктивності з гасіння коксу від температури газів на вході в камеру гасіння

Через конструктивні причини (потужність котла-утилізатора та димососа, обмеження по температурі циркулюючого газу перед котлом-утилізатором, розмір

форкамери, конструкція кільцевого каналу, просторові обмеження тощо) ці установки у роботі не можуть бути (при мінімальних капіталовкладеннях) повністю пере-

ведені на режим роботи з низьким вмістом горючих компонентів в циркулюючому газі. Робота таких блоків на режимах з низьким вмістом горючих компонентів не забезпечить досягнення проектної потужності з гасіння коксу. Також особливості конструкції не дозволяють ефективно реалізувати деякі рішення, притаманні сучасним моноблочним установкам.

Тим не менш ГИПРОКОКС в своїх проєктах реконструкції (модернізації) пропонує рішення щодо підвищення ефективності роботи цих блоків, зменшення їх негативного впливу на довкілля. Деякі з цих рішень описані нижче.

Інтенсифікація теплообміну в камері гасіння завдяки збільшенню температурного напору досягається зменшенням температури циркулюючих газів що надходять у камеру. Для цього на ділянці газового тракту між димососом і камерою встановлюється додатковий теплообмінник (субекономайзер) [4, 5]. Окрім охолодження циркуляційних газів субекономайзер використовується для підігріву хімічно очищеної води перед деаераторами. Реалізація такого рішення дозволяє підвищити продуктивність блоку з гасіння коксу, а також додатково дозволяє зменшити витрату пари в деаератор. Ефективність цього рішення для підвищення продуктивності з гасіння можна побачити на графіку, представленому на рис. 1

Графік побудовано на основі теплового балансу камери гасіння за методикою [3] для наступних умов витрата циркулюючого газу – 90000 $\text{nm}^3/\text{год}$, температура розпеченого коксу – 1050 °C, температура коксу на виході з камери гасіння – 250 °C, температура циркулюючого газу на виході з камери гасіння – 800 °C, угар коксу – 0,5 %, склад циркулюючого газу $\text{CO}=9$ %, $\text{CO}_2=8$ %, $\text{H}_2=2$ %, $\text{CH}_4=1$ %, $\text{O}_2=0,5$ %, $\text{N}_2=79,5$ %. Отже, під час зниження температури циркулюючого газу з 180 °C до 130 °C можливе підвищення продуктивності складає ~ 7,25 %.

Донедавна, на підставі помилкових рекомендацій, у проєктах ГИПРОКОКСу застосовувалися п'ятирусні дуттьові пристрої. Як показала практика, конструкція цих пристроїв забезпечує не достатньо ефективне гасіння коксу, тому що має недоліки. Серед виявлених недоліків конструкції цих пристроїв – великі розміри і неоптимальна форма. Така конструкція не забезпечує рівномірний розподіл циркулюючого газу та рівномірну швидкість сходу коксу в окружному напрямку камери гасіння. Також велика висота пристрою створює проблеми на етапі сушки та розігріву кладки камери (розташування факела пальника коксового газу, перегрів кладки форкамери і недостатній прогрів середньої частини камери тощо).

У наш час оптимальні профілі сучасних дуттьових пристроїв обираються на основі результатів математичного моделювання з застосуванням сучасних програмних комплексів.

Під час реконструкції/модернізації зазвичай виконується заміна розвантажувальних пристроїв періодичної дії на розвантажувальні пристрої безперервної дії. Застосування таких пристроїв дозволило стабілізувати тепловий та аеродинамічний режим блоків, та в певній мірі покращити рівномірність сходу коксу в камері гасіння. Перші конструкції таких пристроїв незважаючи на простоту і надійність конструкції мали суттєвий недолік – недостатню герметичність. Через цю причину мало місце перетікання частини циркулюючого газу з камери гасіння в систему аспірації. У сучасних пристроях ця проблема вирішена завдяки застосуванню сучасного технологічного обладнання.

Як відомо, питома вироблення електроенергії (через використання конденсаційних турбогенераторів) складає приблизно 0,23 МВт/т пари ($P_{\text{тн}}=3,5-3,9$ МПа, $t_{\text{тн}}=420-440$ °C). Кількість пари, яка може бути отримана з 1 т коксу в УСГК, працюючих за класичним принципом, становить до 0,5 т. Отже, з 1 т коксу ми можемо отримати до 115 кВт/т коксу ($0,23 \cdot 0,5 = 0,115$ МВт/т коксу) електричної енергії. Так, завдяки спалюванню в спеціальному котлі-утилізаторі [6, 7] надлишкового циркулюючого газу (від УСГК потужністю 180 т/год – 3 блока по 60 т/год кожний), додатково може бути отримано до 8,74 т/год пари енергетичних параметрів ($P=3,9$ МПа, $t=440$ °C), що в перерахунку на видобуток електричної енергії складає до 2,01 МВт год.

Водночас додаткове питома вироблення пари завдяки утилізації надлишкового газу від УСГК потужністю 180 т/год може складати до 0,0485 т/т коксу ($8,74 : 180 = 0,0485$ т/т коксу). І відповідно додатковий видобуток електричної енергії до 111,5 кВт/т коксу ($0,0485 \cdot 0,23 = 0,01115$ МВт/т коксу).

Отже, сумарні показники з енергоефективності роботи УСГК (180 т/год) сумісно з вузлом утилізації (на базі котла-утилізатора) зростуть і складуть:

– питома вироблення пари ($P_{\text{тн}}=3,9$ МПа, $t_{\text{тн}}=440$ °C) – до 0,5485 ($0,5+0,0485$) т/т коксу;

– питома вироблення електричної енергії – 0,12615 ($0,115+0,01115$) МВт/т коксу або 126,15 кВт/т коксу.

Таким чином, використання надлишкового циркулюючого газу завдяки застосуванню технології утилізації на базі котла-утилізатора дає можливість підвищити енергоефективність УСГК на 9,7 %. Водночас забезпечується значене зниження викидів забруднюючих речовин (зокрема CO).

Використання технологій утилізації дозволяє суттєво зменшити викиди CO з надлишковим циркулюючим газом (до 250-325 mg/nm^3). Такі показники не можуть бути забезпечені під час роботи УСГК на технологічних режимах з максимальним доспалюванням горючих компонентів в кільцевому каналі камери гасіння.

У процесі сухого гасіння коксу неминучі його втрати в результаті реакцій, що відбуваються в камері гасіння УСГК між вуглецем розпеченого коксу і компо-

нентами циркулюючого газу і в результаті подальшого скидання частини циркулюючого газу з контуру УСГК.

Доспалювання горючих компонентів циркулюючого газу в кільцевому каналі камери гасіння збільшує кількість газу, що скидається через свічку форкамери димососа. Але основна маса викидів через цю свічку відбувається завдяки підсмоктуванню повітря в циркуляційний контур УСГК на лінії розрідження після камери

гасіння: в пилоосаджувальному бункері, газоходах котла, циклонах, димососі. Тому головною умовою зменшення викидів (і відповідно “угару” коксу) є досить ефективна герметизація газового тракту УСГК.

Як приклад, зниження продуктивності з гасіння коксу, у разі збільшення угару, можна побачити на графіку представленою на рис. 2.

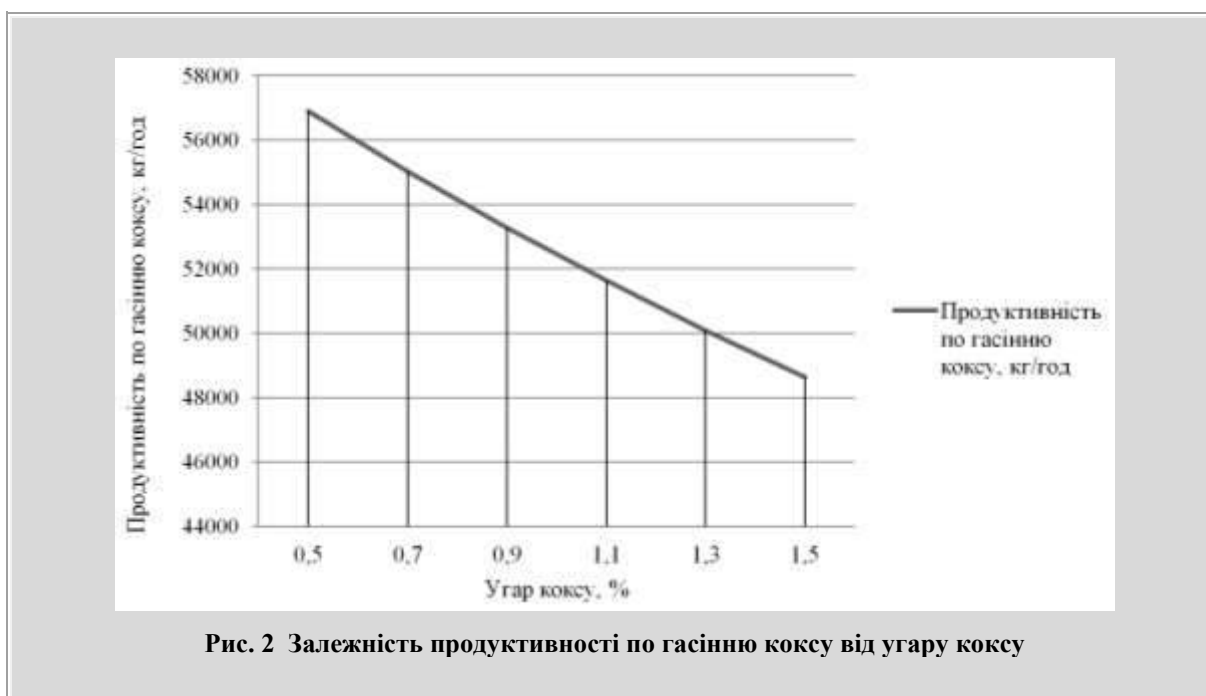


Рис. 2 Залежність продуктивності по гасінню коксу від угару коксу

Графік побудовано на підставі теплового балансу камери гасіння за методикою [3] для наступних умов для наступних умов витрата циркулюючого газу - 90000 $\text{nm}^3/\text{год}$, температура розпеченого коксу - 1050 $^{\circ}\text{C}$, температура коксу на виході з камери гасіння - 250 $^{\circ}\text{C}$, температура циркулюючого газу на виході з камери гасіння - 800 $^{\circ}\text{C}$, температура циркулюючого газу на вході в камеру гасіння - 160 $^{\circ}\text{C}$, склад циркулюючого газу $\text{CO}=9\%$, $\text{CO}_2=8\%$, $\text{H}_2=2\%$, $\text{CH}_4=1\%$, $\text{O}_2=0,5\%$, $\text{N}_2=79,5\%$. Отже, у разі збільшення угару з 0,5 до 1,5 % можливе зниження продуктивності складає $\sim 14,5\%$.

Саме тому для ефективної роботи УСГК після модернізації (реконструкції) культура експлуатації (ведення технологічного процесу згідно з інструкціями, боротьбою з неорганізованими підсмоктуваннями повітря та інше) та своєчасне якісне технічне обслуговування установок мають велике значення. Тому що навіть висока ефективність сучасних інженерних рішень може бути зведена нанівещь низьким рівнем експлуатації та відсутністю технічного обслуговування.

Зниження втрат коксу (угару) під час сухого гасіння та підвищення якісних показників є актуальною зада-

чею для всіх КХВ, що використовують технологію сухого гасіння.

Згідно з даними, отриманими під час попередніх промислових випробуваннях, відзначено що склад циркулюючого газу по вмісту CO та CO_2 впливає на вміст золи в металургійному коксі, показники реакційної здатності CRI, міцності коксу CSR після взаємодії з CO_2 та не впливає на показники механічної порочності M_{25} та стирання M_{10} та гранулометричний склад металургійного коксу. Отримані попередні дані свідчать про позитивний вплив великого вмісту CO (на рівні 12÷15 %) в циркулюючому газі УСГК у порівнянні з низьким рівнем (CO на рівні 4÷6 %) на якість коксу сухого гасіння: зниження вмісту золи та показника реакційної здатності CRI, підвищення показника міцності коксу CSR.

Як відомо, з зменшенням реакційної здатності CRI коксу помітно підвищується його гаряча міцність CSR. Низька реакційна здатність визначає зменшення ступеня розвитку реакцій прямого відновлення заліза, що знижує витрату вуглецю коксу як теплоносія та відновника. З підвищенням значень показника CSR зменшується руйнація коксу в печі, покращується проникність

для газів та рідин у зоні плавлення доменної печі, підвищується продуктивність, знижуються викиди шкідливих речовин тощо.

Так само завдяки додатковому підвищенню якості коксу сухого гасіння може бути забезпечено зниження витрати коксу в доменному виробництві, підвищення продуктивності доменних печей.

Саме тому ГИПРОКОКСом на базі лабораторії одного з наукових підприємств України ведуться роботи з дослідження впливу циркулюючого газу з різним вмістом CO та CO₂ на показники якості коксу (зокрема CSR та CRI) та втрати коксу («угар»).

Висновки

З огляду на вищевикладене, інтенсифікація процесу сухого гасіння коксу наявних установок конструкції ДП «ГИПРОКОКС» може бути досягнута як запровадженням інноваційних технічних рішень (дообладнання), спрямованих на підвищення продуктивності та енергоефективності, зниження викидів (в даному випадку CO), а також веденням процесів (режимів роботи), які дозволять додатково поліпшити якісні показники коксу.

Бібліографічний список

1. *Advanced technology and application of ladge-scale CDQ*, Masayuki Watanabe, Nariuo Hamasaki, JP Steel Plantech Co., Japan. METEC & 2nd ESTAD 2015 / Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.steelplantech.com/wp-](https://www.steelplantech.com/wp-content/uploads/2015/07/Advanced-technology-and-application-of-large-scale-CDQ.pdf)

[content/uploads/2015/07/Advanced-technology-and-application-of-large-scale-CDQ.pdf](https://www.steelplantech.com/wp-content/uploads/2015/07/Advanced-technology-and-application-of-large-scale-CDQ.pdf).

2. **Itakuro Kotaro**. Introduction of Current Technologies for Coke Dry Quenching System / **Kotaro Itakuro** [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eng.nipponsteel.com/files/co/upload/en/whatwe-do/upload/docs/CDQ%20presentation.pdf>

3. Довідник коксохіміка. Т. 2. Виробництво коксу [Під ред. **В.І. Рудики, Ю.Є. Зінгермана**]. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2014. – 728 с.

4. **Абдуллін С.Ю.** Субекономізатор для підвищення енергоефективності блока УСГК / **С.Ю. Абдуллін, А.О. Качура** // Вуглехімічний журнал. – 2021. – №5. – С.12-15. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2021-0-5-4-12>.

5. **Кравченко С.О.** Ефективність встановлення субекономізатора в котельні УСГК // **С.О. Кравченко, С.В. Чаплянко, А.О. Волошин, С.О. Ларін, А.А. Когтін** // Вуглехімічний журнал. – 2023. – № 4. – С.3-6. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-4-3-6>.

6. Довідник коксохіміка. Т. 4. Електропостачання. Забезпечення енергетичними ресурсами. Автоматизація управління технологічними процесами. Технологічний контроль коксохімічного виробництва [Під ред. **В.І. Рудики, Л.Н. Борисова**]. – Харків: ВД «ІНЖЕК», 2015. – 480 с.

7. **Когтін А.А.** Сухе гасіння коксу: утилізація надлишкового циркулюючого газу / **А.А. Когтін** // Вуглехімічний журнал. – 2024. – № 3. – С.22-27. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2024-0-3-22-27>

Рукопис надійшов до редакції 03.02.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-39-44

Specialty 161. U.D.C. 620.9:662.74

IMPROVING THE EFFICIENCY OF EXISTING DRY COKE EXTINGUISHING INSTALLATIONS DESIGNED BY DP ‘GIPROKOKS’ DURING RECONSTRUCTION AND MODERNISATION

© **S.O. Kravchenko**¹, **A.A. Kogtin**²

STATE ENTERPRISE ‘STATE INSTITUTE FOR THE DESIGN OF COKING CHEMICAL INDUSTRY ENTERPRISES’ (SE ‘GIPROKOKS’), 61002, Kharkiv, 60 Sumska Street, Ukraine

¹ **Kravchenko Serhii Oleksandrovych**, Ph.D. in Technical Sciences, Acting Director – Chief Engineer, e-mail: sa_kravchenko@giprokoks.com

² **Kogtin Artem Anatoliyovych**, Project Manager, e-mail: kogtin.giprokoks@gmail.com

The article is devoted to practical solutions for improving the efficiency, productivity and environmental safety of existing dry coke quenching plants (DCQP) designed by SE “GIPROKOKS”. Due to design reasons (the capacity of the waste heat boiler and smoke exhauster, restrictions on the temperature of the circulating gas in front of the waste heat boiler, the size of the forechamber, the design of the ring channel, space limitations, etc.), some installations cannot be completely converted to low-combustible-component circulating gas operation (with minimal capital investment). Operating such units in low-combustible-component modes will not ensure that the design coke quenching capacity is achieved. In addition, design features do not allow for the effective implementation of some solutions inherent in modern monoblock



installations. The article shows possible ways to intensify the dry coke quenching process, increase energy efficiency and reduce emissions (CO).

In particular, it is shown that the intensification of heat exchange in the quenching chamber due to an increase in temperature pressure is achieved by reducing the temperature of the circulating gases entering the chamber. For this purpose, an additional heat exchanger (subeconomiser) is installed in the gas path between the smoke exhauster and the chamber. An example demonstrating the effectiveness of this technological solution is given.

The advantages of using excess circulating gas through the application of waste heat recovery technology based on a waste heat boiler, which makes it possible to increase the energy efficiency of the DCQP by 9.7 %, are highlighted. At the same time, a significant reduction in pollutant emissions (in particular CO) is ensured. The directions for improving the efficiency of the DCQP by reducing coke caking and improving its quality indicators, which affect costs in the blast furnace process, are shown.

A list of elements and equipment used in modern high-power installations of leading global companies is provided.

Keywords: dry coke quenching, waste heat boiler, circulating gas, excess, utilisation, CO content, coke loss, coke quality, energy efficiency, increasing coke quenching productivity.

Corresponding author: A.A. Kogtin, e-mail: kogtin.giprokoks@gmail.com

Manuscript received 2025/02/03

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-44-51

Спеціальність 161. УДК 66.661.1

ВИКОРИСТАННЯ ЗАПАСІВ БУРОГО ВУГІЛЛЯ ДНІПРОВСЬКОГО БУРОВУГІЛЬНОГО БАСЕЙНУ: РОЗВ'ЯЗАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ УКРАЇНИ

© П.П. Карножицький¹

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна

¹ Карножицький Павло Павлович, аспірант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: pavlokarnoenv@gmail.com

Відзначено, що гумінові кислоти (ГК) є одним з найбільш цінних компонентів українського бурого вугілля, загальні (балансові та позабалансові) запаси якого для Дніпровського буровугільного басейну складають близько трьох млрд. тон. Сорбційна здатність цих речовин визначається наявністю карбоксильних груп, фенольних гідроксилів та =N–H і –N– груп. Дана робота присвячена вивченню перспектив використання продуктів переробки землистого бурого вугілля Дніпровського буровугільного басейну (Олександрійське родовище), а саме виділених з них гуматів натрію для глибокого очищення природної (річкової) води від іонів Pb²⁺ та Cd²⁺. Зазначені забруднювачі є одними з найбільш токсичних важких металів, що потрапляють до навколишнього середовища, зокрема, з промисловими стоками. Для забезпечення високого ступеня очищення у даній роботі використовувався метод «комплексоутворення-ультрафільтрація» (КУУФ) з промисловими мембранами, що мають розміри пор < 10 мкм (ПА-10). За рахунок того, що гумати активно взаємодіють у воді з іонами важких металів шляхом комплексоутворення, іонного обміну та фізичної сорбції, а також внаслідок того, що розмір молекул гуматів в основному перевищує діаметр пор мембран, що використовуються, досягнуто ефекту глибокого очищення води від іонів, які досліджуються. Як іони свинцю, так й іони кадмію практично в повному обсязі виділяються з води: селективність процесу «комплексоутворення-ультрафільтрація», що характеризує ефективність очищення, сягнула 97-98 %. Метод КУУФ було застосовано за допомогою спеціальної експериментальної установки. Аналітичні методи включали використання Фур'є-інфрачервоної спектроскопії, а також оптико-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою.

Ключові слова: буре вугілля, гумати натрію, комплексоутворення-ультрафільтрація, сорбція, важкі метали, очищення води.

Автор для листування П.П. Карножицький, e-mail: ipavlokarnoenv@gmail.com

Всесвітні запаси вугілля згідно з даними European Association for Coal and Lignite (EURACOAL) складають 89 % від загальних запасів вуглеводнів. З них 9.3 % складає буре вугілля. Усіма країнами-членами EURACOAL за 2024 рік було видобуто 196.6 мільйонів тон лігнітів [1].

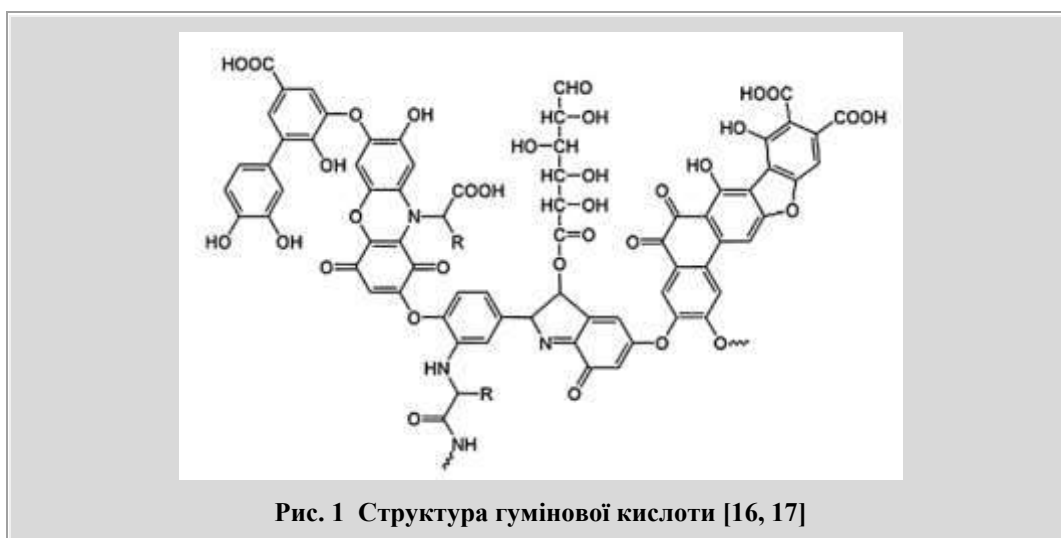
Україна є одним зі світових лідерів із запасу цього каустобіоліту. Запаси бурого вугілля (БВ) в Україні досить значні. Дніпровський буровугільний басейн, що знаходиться на Правобережній Україні та має загальну площу близько 100 тис. км², включає 80 родовищ. Балансові запаси бурого вугілля становлять приблизно 2.6 млрд т., а позабалансові запаси оцінюють в 570 млн т. [2, 3]. В основному, щільне БВ використовують як енергетичне паливо, а землисте вугілля через підвищену вологість та зольність є непридатним для такого застосування. Тому, пошук напрямків використання цього типу бурого вугілля є актуальним. Вартість бурого вугілля, в середньому, нижча у порівнянні з кам'яним. Але навіть значні запаси та легкодоступний видобуток не збільшує інтерес приватних інвесторів та держави до розробки його родовищ [4].

Найбільш цінним компонентом українського землистого бурого вугілля є гумінові кислоти (ГК), вміст яких в цьому вугіллі може перевищувати 80 % в перерахунку на органічну масу вугілля (ОМВ). Відомо, що гумінові речовини мають високу реакційну здатність [5]. Це сприяє зв'язуванню в малорухливі та токсичні сполуки, що важко дисоціюють, а також радіоактивні метали [6].

Мало метаморфзоване вугілля, таке як лігніти та буре землясте вугілля, здатне сорбувати іони важких металів у воді та ґрунті [7]. Сорбційні властивості обумовлені високим вмістом гумінових кислот – складної макромолекулярної органічної сполуки [8], виділеної з бурого вугілля, особливо окисненого [9]. Структура ГК для будь-якого виду сировини відрізняється тільки розмірами молекулярного каркаса [10, 11], та для всіх різновидів практично однакова. Кислоти складаються з набору ароматичних кілець з деякими включеннями гетероатомів та периферійних кисне- та азот-містких функціональних груп, таких як карбоксильні, гідроксильні, хіноїдні й т.д. [12]. За рахунок останніх гумінові кислоти мають високу реакційну здатність, що забезпечує зв'язування важких, токсичних та радіоактивних металів, малорухомих та тих, що важко дисоціюють [6]. Загалом, варто зазначити, що станом на сьогодні ступінь їх застосування в різних галузях наукової та господарчої діяльності є значним [13, 14].

ГК взаємодіють з металами шляхом іонного зв'язку, комплексоутворення та фізичної сорбції [10]. З цього випливає, що використання гумінових кислот або їх похідних в якості сорбентів дозволить створювати сорбенти, більш ефективні, ніж вихідне вугілля. Сорбційна здатність гумінових кислот визнається, в основному, наявністю карбоксильних груп та фенольних гідроксилів, а також =N–H і –N– груп [15].

Відома велика кількість варіантів структурних формул ГК, одна з яких представлена на рис 1.



До однієї з переваг гумінових кислот можна віднести легкість їх виділення з вугілля за допомогою слабких лужних розчинів [18-20], як правило – не більше 1 %, в результаті чого водонерозчинні кислоти переходять в розчин у вигляді легкорозчинних гуматів.

Попри здатність бурого вугілля в нативному вигляді утримувати іони таких металів, як залізо, свинець, хром тощо, їх сорбційні властивості виражені відносно слабо. Це пов'язано з наявністю великого вмісту мінеральних компонентів та інших домішок, які не мають помітних сорбційних властивостей [21, 22]. Тим не менш, використання бурого вугілля має місце, перш за все, завдяки їх доступності та дешевизні, що дозволяє їм конкурувати в деяких випадках із синтетичними сорбентами. В роботах [23-25] застосовувалися дрібнодисперсні ГК в підкисленій воді (рН 2-5), які мають високу питому поверхню і демонструють значно більшу ефективність при зв'язуванні іонів важких металів у порівнянні з вихідним вугіллям. Однак найбільш оптимальним для зв'язування важких металів у воді слід вважати використання розчинів гуматів бурого вугілля [26].

Дана робота спрямована на вивчення здібності гуматів, отриманих з бурого вугілля Олександрійського родовища, видаляти іони токсичних металів в дистильованій та річній воді шляхом комплексоутворення-ультрафільтрація (КУУФ). КУУФ – це гібридний підхід, що полягає в поєднанні ультрафільтрації з попереднім зв'язуванням іонів металу в комплекс. Його перевага лежить у високій селективності поділу, що обумовлена хімічними властивостями реагенту. Такий метод є одним з найбільш ефективних та дозволяє очищувати воду від іонів металів до норм ГДК. Ефективність методу КУУФ полягає у тому, що розмір молекул комплексоутворювачів можна порівняти з розмірами пор ультрафільтраційних мембран, та, в основному пере-

вищують їх. В цьому випадку після утворення стійких комплексів з металами відбувається концентрування останніх над поверхнею мембрани, при цьому через мембрану проходить очищена вода (пермеат).

В низці робіт ГК можна представити як набір молекул з молекулярною масою від 1500 до 50000, що можуть утворювати більш крупні асоціати [10, 27]. Розміри таких асоціатів перевищують 10-20 нм. Це створює передумови з використання розчинів гуматів в процесі КУУФ з мембранами із відповідними розмірами пор.

В якості комплексоутворювачів використовуються, в основному, синтетичні водорозчинні з'єднання, такі як декстрин полідіалілдиметиламоній хлорид, поліетиленімін, тіосемікарбазид та інші полімери з високою молекулярною масою, здатні зв'язувати іони металів. Загальним недоліком таких синтетичних продуктів є можливість їх переходу в пермеат, до того ж такі комплексоутворювачі досить дорогі. Гумати – це природні та дешеві реагенти, що позбавлені таких недоліків, а для України їх ресурс практично невичерпний враховуючи величезні запаси БВ.

О'єкти та методи дослідження

В роботі досліджувалися зразки бурого вугілля Олександрійського родовища. Отримували гумати з бурого вугілля приготуванням 1- % розчину луку, змішували лужний розчин з вугіллям при нагріванні, та відділяли не розчинений осад за допомогою центрифуги. Властивості зразків представлені на табл. 1, 2.

Додатково за допомогою інфрачервоної спектроскопії було досліджено хімічний склад сухих гуматів. Дослідження проводились за допомогою Фур'є-ІЧ спектрометру Nicolet 380.

Рис. 1 Структура гумінової кислоти [16, 17]

Таблиця 1

Технічний аналіз бурого вугілля

Зразок	Вологість, % W ^a	Зольність, % A ^d	Сірчистість, % S _t ^d	Вихід летких речовин, % V ^d	(НА) ^{daf} , %
Буре вугілля	16.8	48.7	2.5	29.1	79.44
Сухі гумати		26.4	3.72	42.4	

Таблиця 2

Елементний склад органічної частини бурого вугілля

Зразок	Вуглець, % C ^{daf}	Водень, % H ^{daf}	Азот, % N ^{daf}	Сірка, % S _t ^d	Кисень, % O ^{daf}
Буре вугілля	61.13	5.56	0.51	3.64	29.16
Сухі гумати	49.04	4.79	0.42	3.72	15.59

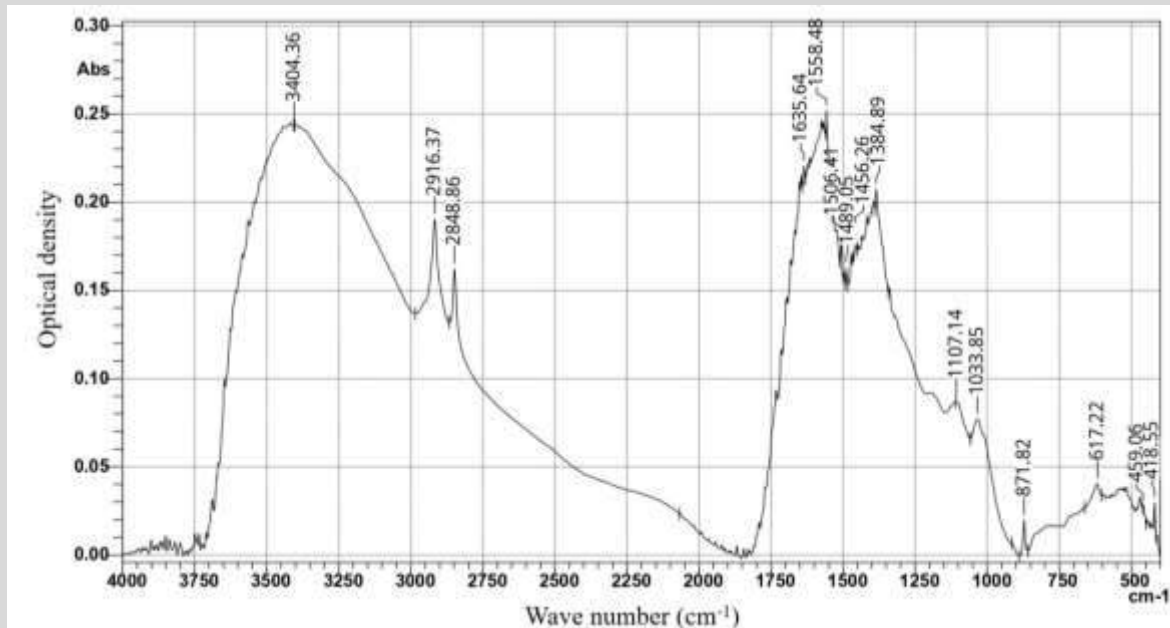


Рис. 1 ІК-спектр гуматів, екстрагованих під час переробки бурого вугілля Олександрійського родовища з використанням гідрокавітаційної активації

Спектр твердого зразка гумату натрію (рис. 1) демонструє широку потужну смугу перекриття в діапазоні $3600\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ з максимумом на 3350 cm^{-1} , що зумовлено його солевою формою. На фоні цієї смуги можна спостерігати піки валентних коливань С-Н метильних і метиленових груп при 3074 cm^{-1} , 2918 cm^{-1} та 2850 cm^{-1} . У ділянці деформаційних коливань виразно помітні інтенсивні смуги з максимумами на 1590 і 1571 cm^{-1} , які в спектрах металевих гуматів свідчать про хелатну координацію, що виникає при формуванні зв'язку – COOMe (де Me – іон металу). У цьому випадку один іон металу зв'язується з обома атомами кисню однієї карбоксильної групи. Поглинання в діапазоні $1550\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$ може бути зумовлене наявністю ароматичних та амідних фрагментів.

В якості ультрафільтраційних мембран використовували мембрани UF-10-PA, які є пористими полімерними плівками на основі поліаміду з розміром пор 10 nm і площею робочої поверхні $28.26 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$. Ці полімерні мембрани відрізняються підвищеною термо- та агресивостійкістю, є нетоксичними, безпечними для використання та можуть експлуатуватися при рН від 2 до 12 і максимальній температурі води до $100\text{ }^\circ\text{C}$. Мінімальна продуктивність дистильованої води становить $60\text{ dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{год}$.

Проби підготовлювали наступним чином: до модельних розчинів металів (Pb^{2+} , Cd^{2+}) з концентрацією 5 mg/l у дистильованій та річковій воді додавали комплексотворювач – гумати (натрієві солі гумінових кислот) в різних концентраціях від $0,0$ до 30 mg/dm^3 . Вміст металів у річковій воді становить: $\text{Cd} = 0,0006\text{ mg/l}$; $\text{Co} < 0,001\text{ mg/l}$; $\text{Cu} = 0,0065\text{ mg/l}$; $\text{Fe} = 0,0050\text{ mg/l}$; $\text{Hg} = 0,0680\text{ mg/l}$; $\text{Mn} = 0,5142\text{ mg/l}$; $\text{Ni} = 0,0029\text{ mg/l}$; $\text{Pb} = 0,0160\text{ mg/l}$; $\text{Zn} < 0,001\text{ mg/l}$.

Дослідження проводили на експериментальній установці (рис. 2).

Установка представляє собою непроточну комірку об'ємом $0,2\text{ dm}^3$ при температурі навколишнього середовища $25\text{ }^\circ\text{C}$. Розчин для розділення заливався через штуцер у прозорий циліндричний корпус комірки, виконаний з полікарбонату. Щоб зменшити вплив концентраційної поляризації, комірка була оснащена електромагнітною мішалкою з пропелером, розташованим на відстані $3\text{--}5\text{ mm}$ від мембрани. Необхідний тиск ($0,2\text{ MPa}$) над мембраною забезпечувався шляхом перепуску певної порції стиснутого повітря з компресора через спеціальні трубки та вентиль. У процесі фільтрації фільтрат, що пройшов через мембрану, та дренаж збиралися у пробовідбірник для подальшого аналізу.

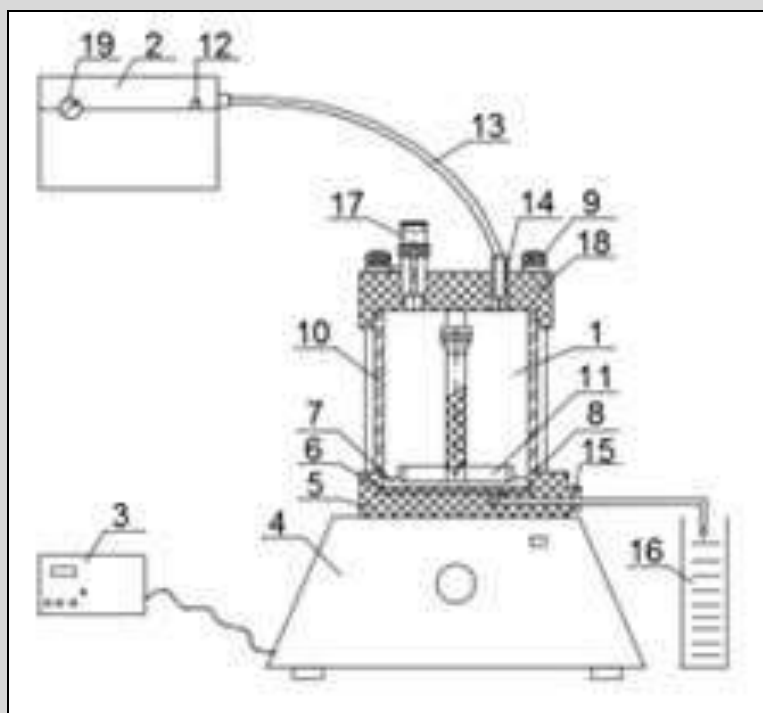


Рис. 2 Схема установки для фільтрації: 1 – мембранна комірка; 2 – компресор; 3 – строботаксометр; 4 – магнітна мішалка; 5 – нижня основа комірки; 6 – пористий фторопласт; 7 – мембрана; 8 – силіконова гума; 9 – болти; 10 – корпус комірки; 11 – пропелер; 12 – вентиль; 13 – трубка; 14 – штуцер; 15 – отвір; 16 – пробочний збірник; 17 – захисний клапан; 18 – верхній фланець; 19 – манометр

Коефіцієнт розділення (селективність, R) мембрани для відповідного металу розраховували за формулою:

$$R = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100, \quad (1)$$

де R – коефіцієнт вилучення металів (селективність), %; C_0 та C_f – концентрації металів у початковому розчині та у фільтраті відповідно, мг/л.

Концентрацію металів у водних розчинах визначали за допомогою оптико-емісійного спектрометра PlasmaQuant PQ 9000 Elite з високою роздільною здатністю та індуктивно-зв'язаною плазмою.

Результати та обговорення.

Результати очищення водних розчинів від іонів металів в залежності від концентрації гумінових речовин (0-30 мг/л) представлені в табл. 3, 4.

Таблиця 3

Концентрація іонів важких металів (мг/л) в залежності від концентрації гуматів (мг/л)

Іон	Концентрація гуматів, мг/л					
	0	2,5	5,0	10,0	20,0	30,0
<i>В дистильованій воді</i>						
Pb ²⁺	4,259	2,543	1,071	0,541	0,257	0,123
Cd ²⁺	4,759	2,956	1,612	1,123	0,512	0,197
<i>В річковій воді</i>						
Pb ²⁺	4,27	2,65	1,102	0,587	0,299	0,151
Cd ²⁺	4,765	3,01	1,793	1,194	0,664	0,231

Таблиця 4

Селективність вилучення металів в залежності від концентрації гуматів

Іон	Концентрація гуматів, мг/л					
	0	2,5	5,0	10,0	20,0	30,0
<i>В дистильовані воді</i>						
Pb ²⁺	0	40,29	74,9	87,3	94,0	97,1
Cd ²⁺	0	37,9	66,1	81,5	89,2	95,9
<i>В річковій воді</i>						
Pb ²⁺	0	37,9	66,1	86,3	90,3	96,5
Cd ²⁺	0	36,0	62,4	77,9	86,0	95,2

Отримані результати свідчать про суттєву ефективність методу КУУФ при очищенні як дистильованої, так й річкової води від іонів свинцю та кадмію. Обидва ці іони практично повністю виділяються з води. При цьому, іони свинцю взаємодіють з гуматами дещо активніше, ніж іони кадмію. Співвідношення гуматів до виділених іонів Pb²⁺, Cd²⁺ складає 0.5:1, при цьому вже має місце значне (селективність – 66-75 %) скорочення вмісту цих іонів у пермеаті. Подальше підвищення співвідношення гуматів до концентрації іонів, що видаляються, закономірно забезпечує глибше очищення води до селективності процесу 96-97 % при співвідношенні гумат : іони Pb²⁺, Cd²⁺ від 1:1 до 3:1. Слід зазначити, що селективність процесу зв'язування вищезгаданих іонів в річковій воді, хоча й дещо зменшується за рахунок впливу інших іонів, але залишається так само достатньо високим. Це свідчить про значно вищій здатності іонів важких металів взаємодіяти з молекулами гуматів.

Висновки

Результати проведених досліджень свідчать, що запаси бурого вугілля Дніпровського буровугільного басейну можуть знайти застосування при рішенні ряду екологічних проблем України як джерела великої кількості гумінових кислот, що майже не знаходять в наш час практичного використання.

Молекули гуматів, отримані з українського БВ, мають здатність ефективно зв'язувати важкі метали у воді та, внаслідок високої молекулярної маси й великих розмірів, легко видаляються з води, що очищується, за рахунок ультрафільтраційних мембран.

Застосування баромембранних процесів дозволить скоротити потрапляння токсичних металів в природні води та покращити екологічну ситуацію в окремих регіонах.

Бібліографічний список

1. European Association for Coal and Lignite aisbl, 2002-2025 / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://euracoal.eu/info/euracoal-eu-statistics/>.

2. Собко Б.Є. Потенційна роль бурого вугілля в енергетичному балансі країни / Б.Є. Собко, А.А. Шустов., А.П. Белов // Національний гірничий університет, Інтехпроект. – Дніпро. – 2018. – 42 с.

3. Дюжєв В. Соціально-економічні, екологічні проблеми збільшення стандартів життєдіяльності населення із застосуванням інноваційних технологій очищення водних ресурсів на основі водорозчинних сорбентів отриманих з українського бурого вугілля / В. Дюжєв, А. Сініцина, П. Карножицький, П. Карножицький // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" (економічні науки). – 2022. – № 4. – С. 88–92. <https://doi.org/10.20998/2519-4461.2022.4.88>.

4. Зелена книга. Регулювання ринку вугілля / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2024/06/10-ZK-Regulyvannya-rynku-vugillya.pdf>.

5. Карножицький П.П. Розробка пілоотної установки для отримання розчину гуматів з бурого вугілля / П.П. Карножицький, Д.В. Мірошніченко, П.В. Карножицький, К.Є. Руднєва // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" (хімія, хімічна технологія та екологія). – 2025. – № 1 (13). – С. 38-42. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2025.01.06>.

6. Manzak A. Characterization of humic acid extracted from aqueous solutions with polymer inclusion membranes / A. Manzak, C. Kurşun, Y. Yıldız // Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers. – Vol. 81. – P. 14–20. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2017.10.024>.

7. Melnikov A. Sorption properties of brown coal processing products / A. Melnikov, D. Miroshnychenko, P.P. Karnozhytskyi, P.V. Karnozhytskyi // Chemistry & Chemical Technology –. 2024. – Vol. 18. – No. 4. – P. 493–501. <https://doi.org/10.23939/chcht18.04.493>.

8. Ashok K. Pandey. Stability Constants of Metal–Humic Acid Complexes and Its Role in Environmental Detoxification / Ashok K. Pandey, Shri Dhar Pandey, Virendra Misra // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2000. – Vol. 47. – Iss. 2. – P. 195-200. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.1947>.

9. Sarlaki E. Valorization of lignite wastes into humic acids: Process optimization, energy efficiency and

- structural features analysis / **E. Sarlaki, A.Sh. Paghaleh, M.H. Kianmehr, K.A. Vakilian** / *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 163. – P. 105-122. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.096>.
11. **Tipping E.** Cation binding by humic substances / **E. Tipping**. – UK: Cambridge University Press, 2004 – 434 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535598>.
12. **Niu H.** (2021). Structural Characterization and Adsorption Capability of Carbonaceous Matters Extracted from Carbonaceous Gold Concentrate / **H. Niu, Yang, L. Tong** // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11. – Iss. 1. – P. 23. <https://doi.org/10.3390/min11010023>.
13. **Jarukas L.** Determination of Organic Compounds, Fulvic Acid, Humic Acid, and Humin in Peat and Sapropel Alkaline Extracts / **L. Jarukas, L. Ivanauskas, G. Kasparaviciene, J. Baranauskaite, M. Marksa, J. Bernatoniene** // *Molecules*. – 2021. – May 18. – Vol. 26. – Iss. 10. – 2995. <https://doi.org/10.3390/molecules26102995>.
14. **Zhylyna M.** The effect of growth stimulants based on humic acids from Ukrainian lignite and biochar from agricultural residues on the growth and development of lettuce (*Lactuca sativa*) / **M. Zhylyna, P.P. Karnozhytskyi, D. Miroshnichenko, V. Konohrai, V. Sterna, J. Ozolins** // *Agronomy Research*. – 2025. – Vol. 23(1). – P. 571–584 <https://doi.org/10.15159/ar.25.013>.
15. **Карножицький П.П.** Можливості використання продуктів переробки бурого вугілля в господарській діяльності / **П.П. Карножицький** // Бекетівські хімічні читання. Теорія та практика кризових ситуацій: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, Харків, 12-14 лютого 2025 р. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2025. – С. 48-52.
16. **Сініцина А.О.** Шляхи вирішення деяких екологічних проблем, викликаних діяльністю людини у військовій сфері / **П.В. Карножицький, Д.В. Мірошніченко, К.Є. Руднева, В.А. Руднев, А.О. Сініцина** // Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони [нід заг. ред. Марченка А.П.]. – Харків: Мадрид, 2021 – С. 235-261.
17. **Joshi R.** Vermicompost as an effective organic fertilizer and biocontrol agent: effect on growth, yield and quality of plants / **R. Joshi, J. Singh, A.P. Vig** // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. – 2015. – Vol. 14. – P. 137–159. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9347-1>.
18. **Stevenson F.J.** Humus Chemistry, Genesis, Composition, Reactions. 2nd Ed. – N.Y.: John Wiley and Sons, Inc, 1994. – 512 p.
19. **Machado Wesley.** (2020). Spectroscopic characterization of humic and fulvic acids in soil aggregates \ **Machado Wesley, Franchini Julio, Fatima Maria, Tavares Filho, João, Brazil** // *Heliyon*. – 2020. – Vol.6. – e04078. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04078>.
20. **Kurniati E.** Humic Acid Isolations from Lignite by Ion Exchange Method / **E. Kurniati, S. Muljani, D. Virgani, B. Neno** // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – 953. – 012234. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012234>
21. **Kravchenko O.** Intensifying the process of extraction of humic acids from brown coal by using the hydrocavitation activation methodology / **O. Kravchenko, D. Miroshnychenko, P.P. Karnozhytskyi, V. Homan, P.V. Karnozhytskyi** // *International Journal of Energy for a Clean Environment*. – 2025. – Vol. 26(4). – P. 61–75. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2024053521>.
22. **Mohan Dinesh.** Removal and Recovery of Metal Ions from Acid Mine Drainage Using Lignite – a Low Cost Sorbent / **Mohan Dinesh, Chander Subhash** // *Journal of hazardous materials*. – 2006. – Vol. 137. – P. 1545-1553. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.053>.
23. **Karczewska A.** The suitability of brown coal as a sorbent for heavy metals in polluted soils / **A. Karczewska, T. Chodak, J. Kaszubkiewicz** // *Applied Geochemistry*. – 1996. – Vol. 11(1-2). – P. 343–346. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00043-7).
24. **Arslan Gulsin.** Physical and chemical factors affecting the adsorption of Cr(VI) via humic acids extracted from brown coals // **Arslan Gulsin, Edeballi Serpil, Pehlivan Erol** // *Desalination*. – 2010. – Vol. 255. – P. 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.01.006>.
25. **Martyniuk H.** Adsorption of metal ions on humic acids extracted from brown coals / **H. Martyniuk, J. Więckowska** // *Fuel Processing Technology*. – 2003. – Vol. 84. – P. 23-36. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00246-1).
26. **Pehlivan E.** Comparison of adsorption capacity of young brown coals and humic acids prepared from different coal mines in Anatolia / **E. Pehlivan, G. Arslan** // *Journal of Hazardous Materials*. – 2006. – Vol. 138. – Iss. 2. – P. 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.063>.
27. **Сініцина А.О.** Буре вугілля – сировина для отримання водорозчинних сорбентів / **А.О. Сініцина, П.П. Карножицький** // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2023. – № 3. – С. 67–77. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.06>.
28. **Erdogan S.** Interaction of metals with humic acid isolated from oxidized coal / **S. Erdogan, A. Baysal, O. Akba, C. Hamamci** // *Polish Journal of Environmental Studies*. – Vol. 16. – No. 5. – 2007. – P. 671-675.

Рукопис надійшов до редакції 12.09.2025 р.

USE OF BROWN COAL RESERVES IN THE DNIPRO BROWN COAL BASIN: SOLVING UKRAINE'S ENVIRONMENTAL PROBLEMS© P.P. Karnozhytskyi¹*National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute' (NTU 'KPI'), 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova St., Ukraine*¹ *Karnozhitsky Pavlo Pavlovich, postgraduate student of the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies, e-mail: pavlokarnoenv@gmail.com*

It has been noted that humic acids are one of the most valuable components of Ukrainian brown coal, whose total (balance sheet and off-balance sheet) reserves for the Dnipro brown coal basin amount to about three billion tonnes. The sorption capacity of these substances is determined by the presence of carboxyl groups, phenolic hydroxyls and =N–H and –N– groups. This work is devoted to studying the prospects for using the products of processing earthy brown coal from the Dnipro brown coal basin (Oleksandriya deposit), namely sodium humates isolated from them for deep purification of natural (river) water from lead and cadmium ions. These pollutants are among the most toxic heavy metals that enter the environment, in particular, with industrial wastewater. To ensure a high degree of purification, this work used the 'complexation-ultrafiltration' method with industrial membranes with pore sizes less than 10 nm.

Due to the fact that humates actively interact with heavy metal ions in water through complex formation, ion exchange and physical sorption, and also due to the fact that the size of humate molecules generally exceeds the diameter of the pores of the membranes used, a deep purification of water from the ions under study is achieved. Both lead and cadmium ions are almost completely removed from water: the selectivity of the 'complexation-ultrafiltration' process, which characterises the efficiency of purification, reached 97-98 %. The 'complexation-ultrafiltration' method was applied using a special experimental setup. Analytical methods included the use of Fourier-infrared spectrometry and inductively coupled plasma optical emission spectrometry.

Keywords brown coal, humic acids, sodium humates, complexation-ultrafiltration process, sorption, heavy metals, water purification.

Corresponding author: P.P. Karnozhitsky, e-mail: pavlokarnoenv@gmail.com

Manuscript received 2025/09/12

ОТРИМАННЯ КОМПОНЕНТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ БЕНЗИНІВ НА БАЗІ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦІВ© К.В. Шевченко¹, А.Б. Григоров²*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна*¹ *Шевченко Кирило Володимирович, докт. філ. (Ph.D.), докторант кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива (ТПНГ та ТП), e-mail: drekstar2007@gmail.com*² *Григоров Андрій Борисович, докт. техн. наук, проф., проф. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: grigorovandrey@ukr.net*

В статті розглянута принципова можливість використання горючих сланців України в якості додаткового потенціалу сировини для виробництва компонентів автомобільного бензину. Показано, що використанню горючих сланців у технологічному процесі виробництва компонентів автомобільних бензинів сприяє ряд суттєвих факторів. По-перше, на території України

сконцентровані значні поклади горючих сланців, представлені Кременецьким, Олександрійським, Львівсько-Волинським родовищами. По-друге, необхідність суттєвого зниження імпортозалежності України в енергетичних ресурсах, зумовлює диверсифікацію існуючих (класичних) джерел вуглеводневої сировини за рахунок використання наявних альтернативних джерел. В якості цих джерел можуть бути використані вторинні ресурси, побічні продукти та горючі копалини (наприклад, горючі сланці), які раніше не використовувалися як джерела вуглеводневої сировини. Спираючись на це, в статті запропоновано для переробки горючих сланців в компоненти автомобільних бензинів використовувати технологію каталітичного піролізу (температура 380–500 °С, тиск 0,1–1,0 МПа та каталізатор – цеоліти). На основі проведених теоретичних досліджень розроблено енергоефективну схему переробки горючих сланців у компоненти автомобільних бензинів, яка складається з окремих, взаємопов'язаних між собою технологічних блоків. Зазначена схема дозволяє переробляти побічні продукти у вигляді вуглеводневих газів – алканів (C_1 – C_4) в теплову енергію; гази – олефіни (C_2 – C_4) – у високооктанові оксигенатні добавки до автомобільного бензину. При цьому, рідку важку фракцію (C_{15+}) слід використовувати в якості сировини для гідрокрекінгу, спрямованого на отримання базової бензинової фракції. Реалізуючи принципи рекуперації тепла, відходи виробництва – димові гази – слід використовувати для генерації електричної енергії, виробництва водяної пари та гарячої води, а кокс – для виробництва адсорбентів, які в подальшому можуть використовуватися при очищенні рідких продуктів піролізу – сланцевої нафти або виділених з неї бензинових фракцій.

Ключові слова: горючі сланці, технологічна переробка, автомобільний бензин, каталітичний піроліз, вуглеводневі гази, синтез, оксигенати, бензинова фракція, компаундування.

Автор для листування А.Б. Григоров, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

Забезпечення країни нафтовою сировиною – це не лише питання енергетики, а й стратегічна основа економічної стабільності, національної безпеки та незалежності. Власні нафтові ресурси надають можливість контролювати ціни, знижувати імпорту залежність і гарантувати стійкість економіки навіть у кризових умовах. Враховуючи сучасні геополітичні умови, що склалися навколо України, диверсифікація джерел енергоресурсів стає критично важливою задачею, яка може бути вирішена за рахунок часткового заміщення нафтової сировини альтернативною сировиною – сланцевою та синтетичною нафтою, а також рослинного походження (спиртами). При цьому в Україні, досить стрімко розвиваються технології переробки синтетичної нафти та біосировини в компоненти або товарні моторні палива, зокрема автомобільні бензини. Разом з тим, приділено досить незначну увагу використанню сланцевої нафти, отримуваної при технологічній переробці горючих сланців (сланцю менілітового), розвідані балансові запаси (А+В+С1) яких в Україні становлять до 5 млн. тон умовного палива [1]. Горючі сланці можна вважати найбільшим резервом органічної сировини після вугілля, що може зробити їх альтернативною сировиною у технології виробництва автомобільних бензинів.

Основні розвідані поклади горючих сланців в Україні сконцентровані у Прикарпатті, Дніпровсько-Донецькій западині та Донбасі [2, 3]. Склад горючих сланців досить різноманітний, оскільки вони являють собою осадову породу, насичену органічною речовиною (керогеном) та мінеральними домішками. Горючі сланці можуть містити від 10 до 50 % органічної речовини, яка характеризується високим вмістом вуглецю (56–82 %), водню (7–10 %), кисню (9–10 %), сірки (1,5–9 %), азоту (1–6 %) [4]. В складі горючих сланців, залежно від родовища, вміст вологи зазвичай знаходиться на рівні до 4,5 % [5].

Використання горючих сланців в Україні для отримання теплової енергії, в наслідок низької теплоти згоряння (зазвичай до 10 МДж/кг) та значної кількості золи (60–80 %) [6], вважається економічно недоцільним. Разом з цим, досить перспективними напрямками їх переробки є газифікація та піроліз, що дозволяє отримувати сланцеву нафту – суміші рідких вуглеводнів [7–10], з якої в подальшому можна виробляти компоненти товарних автомобільних бензинів. Порівнюючи ці два процеси з урахуванням кінцевих продуктів, технологічної складності та економіки, слід зазначити, що піроліз має суттєві переваги перед газифікацією. До них належать:

– Багатопродуктовість процесу. При піролізі отримують не лише горючий газ, а й сланцеву нафту, смоли, бітумоподібні речовини, феноли, парафіни, коксовий залишок, які можуть бути цінною сировиною для хімічної промисловості; газифікація ж орієнтована переважно на виробництво синтез-газу ($CO + H_2$);

– Вища цінність продуктів. Сланцева нафта після переробки може замінювати нафтові фракції в паливі, а також є сировиною для отримання бензину, дизпалива, мастил. Вартість рідких продуктів вища за газоподібні, що робить піроліз економічно привабливішим;

– Менша енерговитратність. Піроліз можна вести при нижчих температурах (450–550 °С), тоді як газифікація потребує 800–1000 °С і подачі газифікуючих агентів (пара, кисень, CO₂);

– Гнучкість у використанні продуктів. Продукти піролізу можна спрямувати на паливну чи хімічну переробку; газифікація ж обмежена переважно паливним і синтез-газовим напрямом;

– Менша залежність від складу сланцю. Піроліз ефективно працює навіть на бідних сланцях (низька теплота згоряння, високий вміст мінеральної частини); газифікація ж потребує більш стабільної сировини для ефективності процесу;

– Екологічні аспекти. При сучасних технологіях піролізу легше віділити й утилізувати шкідливі домішки (феноли, сірковмісні сполуки) на стадії конденсації рідких продуктів; у газифікації ж вони одразу потрапляють у газовий потік, що ускладнює очищення.

Отже, процес піролізу під час якого кероген (високомолекулярна полімероподібна речовина горючих сланців [11, 12]) при нагріванні до температур понад 450 °С здатна розкладатися на сланцеву нафту, газ і твердий залишок (кокс) є привабливішим з точки зору отримання компонентів автомобільних бензинів ніж газифікація.

Переробку горючих сланців можна проводити як звичайним термічним піролізом, так і піролізом з використанням каталізаторів (термокаталітичний піроліз). Технологічні режими різних видів піролізу та характеристика отриманих продуктів наведені відповідно в табл. 1 та табл. 2.

Аналізуючи данні, представлені в табл. 2., слід зазначити, що використання каталізаторів при піролізі горючих сланців дозволяє знизити температуру процесу на 50–100 °С, підвищити вихід бензинової фракції (C₅–C₁₀) на 15–20 % мас., зменшити кислотність продуктів та вміст у них смол і сірки, інтенсифікувати утворення ароматичних вуглеводнів. Основні типи каталізаторів, що доцільно використовувати при термокаталітичному піролізі горючих сланців, представимо у вигляді структурної схеми, яка наведена на рис. 1.

Таблиця 1

Технологічні режими термічного та термокаталітичного піролізу горючих сланців

Параметр	Термічний піроліз	Каталітичний піроліз
Температура, °С	450–550	380–500
Тиск, МПа	0,1–0,5	0,1–1,0
Тривалість процесу, хв.	20–60	до 2
Каталізатор	немає	цеоліти (HZSM-5, Y), Al ₂ O ₃ , NiMo/Al ₂ O ₃ , Ga-ZSM-5

Таблиця 2

Характеристика отриманих продуктів при термічному та термокаталітичному піролізі горючих сланців

Продукт	Термічний піроліз	Каталітичний піроліз
Вихід бензинової фракції (C ₅ –C ₁₀), % мас	15–20	30–40
Вихід дизельної фракції (C ₁₁ –C ₂₀), % мас.	20–30	20–25
Вихід мазутної фракції, % мас.	25–35	10–15
Вихід газу (C ₁ –C ₄), % мас.	10–15	15–20
Вихід коксу, % мас.	15–20	10–15
Вміст ароматичних вуглеводнів в бензиновій фракції, %	5–8	15–25
Вміст кисневмісних сполук у сланцевій нафті (феноли, кислоти), %	10–15	2–5

Цеолітні каталізатори, до котрих можна віднести HZSM-5, Y, β, сприяють піролізу важких органічних компонентів (керогену) горючих сланців та ароматизації отриманої бензинової фракції. Вони мають кислотні центри Бренстеда та Льюїса [13, 14], володіють мікропористою структурою, яка характеризується селектив-

ністю до бензинової фракції (зростання виходу до 20 %) та ароматичних вуглеводнів (C₆–C₈). Робочі температури для цих каталізаторів знаходяться в межах 380–500 °С, тиск – атмосферний або низький надлишковий. При використанні означених каталізаторів, зменшується смолистість і кислі домішки у продуктах піролізу,

але вони схильні до закоксування, отже потребують регенерації [15, 16].

Металеві каталізатори на носіях (Ni/Al₂O₃, Mo/Al₂O₃, CoMo/Al₂O₃) сприяють гідрогенізації, десульфурізації, денітрифікації. Вони використовуються у присутності H₂ при температурах 350–450 °С та тисках 3–10 МПа [17]. Сприяють перетворенню важких фракцій керогену на більш легкі вуглеводні. Здатні зменшувати в продуктах піролізу кількість сірки, азоту та кисневмісних сполук. Підвищують стабільність і якість

бензину/дизеля. При цьому, мають високу вартість, потребують присутності водню та високого тиску.

Оксидні каталізатори (Fe₂O₃, CaO, MgO, ZnO) вважаються допоміжними каталізаторами для піролізу та очищення продуктів. Так, Fe₂O₃ сприяє частковій ароматизації і деструкції важких молекул; CaO, MgO – нейтралізують кислоти, зменшують кислотність смол; ZnO – уловлює сірку. Даний тип каталізаторів мають низьку вартість, стійкі до високих температур, але характеризуються нижчою селективністю до бензину та ароматичних вуглеводнів [18].



Природні глини та алюмосилікати (бентоніт, каолін) є недорогими каталітичними агентами для низькотемпературного піролізу горючих сланців [19]. Для них робочі температури знаходяться в межах 450–550 °С. Вони характеризуються слабкою кислотністю та каталізують розкладання керогену, низькою вартістю, простою використання, але сприяють утворенню широкого спектру продуктів, мають низьку селективність до бензину.

Композитні каталізатори (цеоліт + метал) характеризуються поєднанням кислотної та гідрогенуючої активності [20]. До каталізаторів такого типу можна віднести: Ni/HZSM-5, Ga/HZSM-5, Pt/Al₂O₃. Робочі температури для таких каталізаторів знаходяться в межах 380–500 °С. Вони використовуються при атмосферному або низькому тиску, мають високу селективність до бензину та ароматичних вуглеводнів, але вартісні та потребують постійної регенерації.

Спираючись на представлену вище інформацію слід зазначити, що практичне розвинення напрямку енергетичної переробки горючих сланців надасть можливість створення нових виробничих кластерів, що сприятиме

сталому розвитку промисловості, економіки та підвищенню обороноздатності України за рахунок накопичення стратегічного запасу палива. Для цього необхідно розробити енергоефективну технологію переробки горючих сланців в компоненти автомобільних бензинів, яка буде забезпечувати виробництво товарної продукції, що відповідатиме вимогам діючих стандартів.

Застосування поняття «енергоефективна технологія» до переробки горючих сланців передбачає впровадження у нафтопереробну та нафтохімічну промисловість України технологічного процесу, який забезпечить прогнозований вихід компонентів автомобільного бензину при мінімальних енергетичних витратах. Основні показники, зазначеної технології представимо у вигляді структурної схеми, наведеної на рис. 2.

Аналізуючи інформацію, представлену на рис.2, слід зазначити, що *мінімізація витрат енергії* при переробці горючих сланців буде полягати в використанні меншої кількості палива, електроенергії або тепла на одиницю продукції. Цього можна досягти, використовуючи принцип рекуперації надлишкового тепла продуктів піролізу. Так, тепло від гарячих продуктів піро-

лізу слід використовувати для підігріву сировини або реактора. Досить ефективним можна вважати встановлення теплообмінників між відхідними газами та сланцем задля його підігрівання гарячими газами, що виходять з реактору. Частину утворених вуглеводневих газів (C_1-C_4), можна використовувати як технологічне паливо для нагрівання реакційної суміші безпосередньо в реакторі піролізу. Для цього необхідно підключити газові пальники на відхідний газ для нагріву сланців. Сланці, що надходять на переробку, також можна підігрівати за рахунок тепла, яке має кокс після піролізу. Пару, яка утворюється при конденсації рідких фракцій

піролізу, слід спрямовувати на підігрів реактора або сушіння сировини. Мінімізації витрат енергії можна досягти шляхом оптимізації електричних потоків за рахунок: використання енергоефективного обладнання (насоси, вентилятори, компресори з високим ККД); використання підключення через частотні перетворювачі для регулювання потоку; автоматичне регулювання режимів (уникнення перегріву та надлишкового споживання електроенергії); використання відпрацьованого тепла для генерації електрики (когенерація та Organic Rankine Cycle) [21].

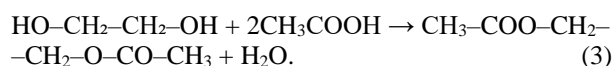
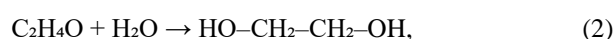


Рис. 2 Основні показники енергоефективної технології

Високий вихід цільового продукту – компоненту автомобільного бензину (фракція 80–200 °C) при переробці горючих сланців, можна забезпечити шляхом застосування комплексу технологічних і хімічних рішень, які полягають в наступному: оптимізація режиму піролізу (регулювання температури та швидкості нагрівання, тиску); використання ефективних каталізаторів; впровадження ректифікації з рециклом (важку фракцію C_{12+} повертають на гідрокрекінг); використання тепло-енергетичної інтеграції (рекуперация тепла, оптимізація балансу газ/рідина – газу (C_1-C_4) частково повертаються як реагенти у реактор для паро- або газофазного піролізу); спрямування реакцій у бік бензинових вуглеводнів (застосування водню зменшує утворення смоли, збільшує вихід C_5-C_{10}); ароматизація олефінів (утворення толуолу, ксилолів). Дуже перспективним напрямком підвищення виходу компонентів автомобільного бензину можна вважати переробку газів піролізу в оксигенатні добавки, здатні підвищувати стійкість до детонації автомобільного бензину [22]. Газу каталітичного піролізу горючих сланців складаються з алканів

(CH_4 – 20–35 %, C_2H_6 – 5–12 %, C_3H_8 – 3–8 %, C_4H_{10} – 2–6 %), алкенів (C_2H_4 – 8–15 %, C_3H_6 – 10–18 %, C_4H_8 – 6–12 %), водню (3–8 %) та інших домішок (загальний вміст CO , CO_2 , N_2 , H_2S складає 1–5 %). Таким чином приблизно 30–61 % газів піролізу може бути спрямовано на забезпечення установки каталітичного піролізу горючих сланців тепловою енергією, а 24–45 % – для синтезу оксигенатних добавок.

Переробка етилену (C_2H_4) в оксигенати протікає через стадії утворення етиленоксиду (EO) та етиленгліколю (EG) за наступною схемою:



Для отримання EO (див. рівняння 1) використовується промисловий каталізатор – срібло (Ag) на носії,

температура в межах 200–300 °С та помірний тиск; для отримання EG (див. рівняння 2) – гідроліз в присутності гетерогенних каталізаторів (ZnO, SiO₂/Al₂O₃) при температурах 40–80 °С та тисках 0,1–1 МПа. Основним продуктом цих реакцій є оксигенат – диметиловий ефір етиленгліколю (DME) (див. рівняння 3), який має температуру кипіння 83–85 °С, октанове число 110–120 (RON), густину при 20 °С 860 кг/м³, а також характеризується високою сумісністю з бензином та низькою токсичністю.

Також можна використовувати Wacker-процес [23], який представляє собою класичне промислове окиснення етилену до ацетальдегіду (CH₃CHO) за участю каталітичної системи PdCl₂/CuCl/O₂, яке реалізується за наступною схемою:



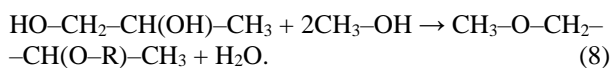
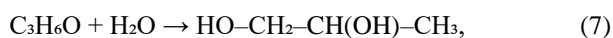
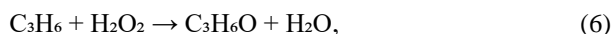
При цьому PdCl₂ окиснює етилен до ацетальдегіду у присутності води, а Pd²⁺ відновлюється до Pd⁰ під час реакції за рахунок використання CuCl/O₂.

Наступним етапом у виробництві оксигенатів до автомобільних бензинів виступає процес гідрування ацетальдегіду (CH₃CHO) до спирту, зазвичай етанолу (CH₃CH₂OH), за участю каталізатора та водню за наступною схемою:



При гідруванні використовується каталізатор Ni, Pt, Pd, температура в межах 50–200 °С (залежить від каталізатора), тиск H₂ – 1–5 МПа, а в якості розчинника використовують воду або органічні розчинники (ацетон, спирт).

Переробка пропілену (C₃H₆) в оксигенати протікає через стадії утворення пропіленоксиду (PO) та пропіленгліколю (PG) за наступною схемою:



За використання технології Hydrogen Peroxide to Propylene Oxide (HPPO) [24] пропілен (див. рівняння 6) перетворюється на пропіленоксид (PO) за умов застосування каталізатору TS-1 або інших гетерогенних каталізаторів, помірних температур (60–120 °С) та контролю H₂O₂. Далі, пропіленоксид (див. рівняння 7) перетворюється в пропіленгліколь (PG) шляхом кислотного (каталізатор – H₂SO₄, H₃PO₄; температура 30–80 °С; атмосферний або трохи підвищений тиск) або основного (каталізатор – NaOH, KOH; температура 40–100

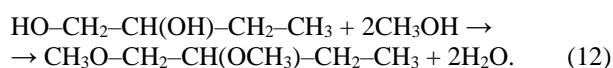
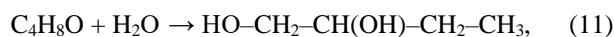
°С; атмосферний або трохи підвищений тиск) каталізу. Основним продуктом цих реакцій є оксигенат – диметиловий ефір пропіленгліколю (DMPG) (див. рівняння 8), який має температуру кипіння 118–120 °С, октанове число 110–115 (RON), густину при 20 °С 870 кг/м³, характеризується високою сумісністю з бензином та низькою токсичністю.

Як окремий напрямок отримання оксигенатів слід навести гідратацію пропілену, що є класичним промисловим методом отримання ізопропанолу (IPA) та реалізується на наступною схемою:

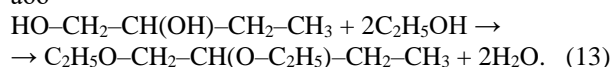


Зазначена реакція може проводитися як за прямою схемою (температура 250–300 °С, тиск – 6,0–10,0 МПа, мольне співвідношення C₃H₆ : H₂O = 1 : 0.6–1.0, каталізатор – H₃PO₄/SiO₂), так і за непрямою схемою, через сірчану кислоту (температура 80–100 °С, тиск – 0,3 – 0,6 МПа, мольне співвідношення C₃H₆ : H₂O = 1 : 0.6–1.0, каталізатор – 95–98% H₂SO₄). Ізопропанол можна розглядати як оксигенатну добавку до автомобільного бензину, оскільки він має температуру кипіння на рівні 82.5 °С, густину при 20 °С – 785 кг/м³, октанове число 118(RON), вміст кисню – 26 % мас., а також має сумісність з вуглеводнями (кращу, ніж у метанолу, але гіршу, ніж у етанолу).

Переробка бутіленів в оксигенати передбачає різні напрямки, один з яких, проходить через стадію утворення бутіленоксиду (C₄-епоксиди) за наступною схемою:



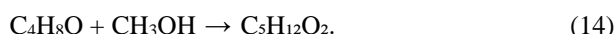
або



Механізм утворення бутілоксиду (див. рівняння 10) полягає в пероксидному окисненні бутілену в умовах, аналогічних для пропілену (див. рівняння 6). Наступною стадією процесу виступає отримання бутіленгліколю (див. рівняння 11) при кислотному (H₂SO₄) або лужному каталізаторі (NaOH, KOH), температурі 50–120 °С та тисках 0,1–1,0 МПа. На кінцевій стадії цих перетворень (див. рівняння 12–13) при використанні каталізаторів (H₂SO₄, HClO₄, Amberlyst-15) і за температури 100–180 °С можна отримати диметиловий ефір бутіленгліколю (DMEG) або діетиловий ефір бутіленгліколю (DEEG). Означені ефіри в наслідок своїх властивостей є

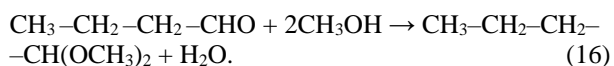
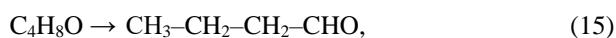
перспективною оксигенатною добавкою до автомобільних бензинів (для DMEG: температура кипіння – 145–155 °С, густина при 20 °С – 900 кг/м³, октанове число – 110–112 (RON), вміст кисню – 16–17 % мас., має добру сумісність з вуглеводнями; для DEEG: температура кипіння – 185–195 °С, густина при 20 °С – 870 кг/м³, октанове число – 108–110 (RON), вміст кисню складає – 22 % мас., а також має добру сумісність з вуглеводнями).

Також, отримання оксигенатів може проходити шляхом етерифікації бутіленоксиду спиртами за наступною схемою:

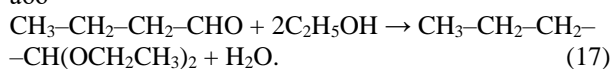


Умови протікання цієї реакції передбачають використання в якості каталізаторів мінеральні кислоти (H₂SO₄, HClO₄) кислото-обмінні смоли (Amberlyst-15, Nafion) та цеоліти (H-ZSM-5, H-BEA). Температура повинна знаходитися в межах 100–140 °С (для селективності), тиск – 0.3–1.5 МПа (щоб спирт залишався у рідкій фазі), молярне співвідношення бутіленгліколь : метанол – 1 : 1.2–2 (легкий надлишок спирту для зміщення рівноваги), повинне здійснюватися азеотропне дистиляційне або вакуумне видалення води. Продуктом цього перетворення виступає бутоксметанол (C₅H₁₂O₂), який має наступні властивості: температура кипіння – 160–165 °С, густина при 20 °С – 890 кг/м³, октанове число – 105–108 (RON), вміст кисню складає – 19–20 % мас., має добру сумісність з вуглеводнями. Завдяки цим властивостям він може використовуватися в якості оксигенатної, октанопідвищуючої добавки до автомобільних бензинів.

Бутіленоксид можна трансформувати в альдегід шляхом кислотного/лужного розкриття епоксиду з подальшою ацеталізацією з спиртами альдегідів для утворення високооктанових оксигенатів для автомобільних бензинів за наступною схемою:



або



Розкриття епоксиду (див. рівняння 15) може проходити як в присутності кислотних каталізаторів (H₂SO₄, HCl, кислотно-обмінні смоли (Amberlyst-15), так і лужних (NaOH, KOH) каталізаторів. Процес протікає при температурі 50–120 °С. тисках 0.1–1 МПа, в якості розчинника використовують воду або водно-спиртову суміш, тривалість реакції – 1–5 годин. Основними про-

дуктами реакції, в залежності від спирту який використовується для ацеталізації (див. рівняння 16–17) можна отримати або диметильовий ацеталь бутаналі (C₆H₁₄O₂), або діетильовий ацеталь бутаналі (C₈H₁₈O₂). Означені ефіри за своїми властивостями подібні до диметильового ефіру бутіленгліколю (DMEG) або діетильового ефіру бутіленгліколю (DEEG), але відрізняються від них способом отримання та місцем приєднання метоксильних (для DMEG – всередині молекули, на центральному С; для ацеталі – на кінцевому альдегідному С) і етоксильних (для DEEG – всередині молекули, частково зберігається ОН; для ацеталі – на кінцевому альдегідному С, дві групи –O–CH₂CH₃) груп.

Підсумовуючи напрямок виробництва оксигенатних високооктанових добавок до автомобільних бензинів, отриманих з газової сировини (C₂–C₄) – продукту каталітичного піролізу горючих сланців, зазначимо, що серед основних переваг при використанні цих продуктів слід виділити наступні: вони сприяють повнішому згорянню бензину в двигуні; знижують викиди СО та СН у продуктах згорання палива; зменшують детонацію при згорянні бензину. Разом з тим, вони забезпечують меншу теплоту згорання ніж бензин (30–35 МДж/кг проти 42–44 МДж/кг), характеризуються гігроскопічністю. Ефективною концентрацією зазначених оксигенатів в автомобільному бензині слід вважати 5–10 % об., при якій відбувається підвищення октанового числа на 2–4 пункти. Окрім того, ці добавки не входять до основних оксигенатів, дозволених стандартами ASTM D4814 / EN 228, які діють у США та ЄС, тоді як етанол, МТБЕ і ЕТБЕ є офіційно дозволеними.

Використання систем автоматичного керування (САК) при каталітичному піролізі горючих сланців є критично важливим для безпечної, ефективної та економічної роботи установки. Сьогодні такі системи широко використовуються у промисловості [25, 26]. Основними завданнями САК можна вважати:

– Підтримання оптимальної температури реакції: температура піролізу сланцю сильно впливає на вихід газів, олефінів і коксу, а САК забезпечує підтримку заданої температури в реакторі ±1–2 °С;

– Контроль тиску: піроліз проходить при підвищеному тиску, особливо в реакторах з циркуляцією каталізатора, а САК регулює клапани та компресори для підтримання стабільного тиску, запобігаючи аваріям;

– Регулювання подачі сировини та каталізатора: дозування сланцю та каталізатора має бути точним для підтримки оптимального молярного співвідношення С/Н і каталізатор/сировина;

– Контроль теплових потоків та енергетичного балансу: САК регулює подачу пари та гарячого газу, оптимізуючи рекуперацію тепла, забезпечує ефективну роботу теплообмінників та економію палива;

– Моніторинг вихідного продукту: автоматичні датчики контролюють склад газів C₁–C₄, олефінів і арома-

Системні методи поєднують:

– Системи автоматичного керування (САК);

– Рекуперацію тепла: використання гарячих газів для нагріву сировини або для генерації пари зменшує енергетичні втрати;

– Переробку побічних продуктів: тверді відходи (кокс) можна використовувати як паливо для топки реактора або для створення адсорбентів для очищення бензинових фракцій від смолисто-асфальтенових речовин; легкі гази (C_2 – C_4) слід використовувати як сировину для виробництва оксигенатів та синтетичних змашувальних матеріалів;

– Створення замкнутого циклу води тощо.

Таким чином, на підставі проведених теоретичних досліджень, можна запропонувати енергоефективну структурну блок-схему (див. рис. 3) переробки горючих сланців в компоненти автомобільних бензинів.

Нижче розглянемо основні блоки та технологічні операції, які реалізуються в цих блоках.

Блок підготовки горючих сланців до переробки зазвичай охоплює низку послідовних операцій, спрямованих на забезпечення однорідності гранулометричного складу, зниження вологості та небажаних домішок, підвищення ефективності теплової та каталітичної переробки (рівномірний прогрів, менше утворення коксу, стабільний вихід рідких і газоподібних продуктів). До числа основних технологічних операцій цього блоку можна віднести: дроблення (сланець подають у щоківі, молоткові чи валкові дробарки для подрібнення до розміру 5–50 мм); сортування – грохочення та класифікація (відокремлення надмірно великих шматків та пилу шляхом застосування вібросит або повітряної класифікації); знешламлення (видалення мінеральних домішок, піску, глини); сушіння – зниження вологи шляхом продування гарячого повітря, димових газів або в спеціальних сушильних барабанах (волога виходить у вигляді водяної пари разом із сушильним агентом); транспортування і дозування (підготовлений сланець транспортується конвеєрами/елеваторами в бункери-накопичувачі, а перед подачею у реактор здійснюється дозування для рівномірного завантаження).

Блок переробки горючих сланців є ключовою частиною технологічної схеми та служить для глибокого розкладання органічної речовини (керогену) в умовах дії каталізаторів, температури та тиску. Основним апаратом в цьому блоці є трубчастий реактор каталітичного піролізу, киплячого або псевдозрідженого шару. Інтервал робочих температур – 450–550 °С, тиск – від атмосферного до 2–3 МПа (залежно від технології). В якості каталізаторів доцільно використовувати цеоліти (HZSM-5, Y-цеоліти), Al_2O_3 , $SiO_2-Al_2O_3$, $Ni/Co-Mo/Al_2O_3$. В реакторі відбувається спрямоване розщеплення важких смолистих сполук на легкіші фракції – гази, бензинова фракція (C_5 – C_{12}), важка фракція (C_{12+}),

ароматичні вуглеводні (C_6H_6 , $C_6H_5CH_3$ та $C_6H_4(CH_3)_2$). До блоку переробки горючих сланців також відносяться система подачі сировини та каталізатора, а у випадку застосування технології з псевдозрідженим шаром – безперервна циркуляція каталізатора.

Блок регенерації каталізатора в установці каталітичної переробки горючих сланців виконує одну з найважливіших функцій – відновлення активності каталізатора, на поверхні якого під час реакції осідає кокс і важкі смоли. Даний блок забезпечує стабільну активність каталізатора, підтримує тепловий баланс процесу (тепло від спалювання коксу використовується в циклі) та сприяє мінімізації викидів шкідливих газів. Основні етапи роботи блоку регенерації каталізатора: відведення каталізатора з реактора (каталізатор, вкритий коксом, безперервно або періодично виводиться з реакційної зони); подача в регенератор (зазвичай використовується апарат киплячого шару в якому каталізатор перемішується потоком повітря (іноді з додаванням пари чи інертного газу); спалювання коксу (температура – 550–650 °С, тиск – 0,2–0,5 МПа); охолодження і очищення газів (оскільки димові гази після регенерації містять CO_2 , CO , H_2O , SO_2 , NO_x , то для їх очищення встановлюються циклони, рукавний фільтр, скруббер); повернення каталізатора в реактор (відновлений каталізатор охолоджується, щоб не перегріти реактор). Димові гази спрямовуються до блоку підготовки (для сушки горючих сланців), а далі – до блоку генерації електричної енергії.

Блок активації коксу призначений для перетворення побічного коксу, що утворюється при піролізі горючих сланців, у активний вуглецевий адсорбент. Це дозволяє зменшити відходи й отримати цінний продукт для очистки газів, води чи використання в каталізаторах. Основним призначенням даного блоку можна вважати отримання активованого вуглецю з питомою поверхнею 500–1500 m^2/g , що досягається за рахунок підготовки коксу (подрібнення до 0,5–5 мм, сушка при 100–120 °С підігрітим повітрям), його вуглефікації (нагрівання до 400–600 °С у відсутності кисню), власне активації (газова або хімічна), охолодження (в інертній атмосфері – азот або CO_2), промивки (вимивання залишків реагентів) та сушіння (при температурі 100–120 °С) і класифікації (розсів за гранулометриєю – порошок, гранульований активний вуглець).

Блок сепарації продуктів після каталітичного піролізу горючих сланців призначений для розділення газоподібних і рідких фракцій. Зазначене розділення реалізується за рахунок тиску (метод заснований на різниці щільності та фазової поведінки компонентів при різному тиску) та має ряд переваг: дозволяє регулювати фракційний склад продуктів шляхом контролю тиску в сепараторі; підвищує ефективність конденсації легких рідких фракцій; зменшує потребу в додатковому охо-

лодженні. При цьому, суміш продуктів подається у сепаратор через систему редукційних клапанів або сопел. При зниженні тиску рідина частково випаровується, а рух газу прискорюється. Внаслідок зменшення тиску та швидкого охолодження частина рідких фракцій конденсується. Верхня частина – газова фаза, яка є легшою за рідку, відводиться у газову систему. Нижня частина – рідка фаза – осідає під дією гравітації та збирається в резервуарі. В деяких випадках доцільно застосовувати центробіжне відокремлення, яке реалізується при високих швидкостях обертання та є більш ефективним для видалення дрібних крапель рідкої фази.

Блок розділення газів після каталітичного піролізу горючих сланців призначений для виділення цінних газових компонентів із суміші парогазових продуктів і підготовки їх до використання як сировини або палива. Основні технологічні операції, які реалізуються в блоці розділення газів, можна поділити на наступні: попереднє очищення (відокремлення рідини та твердих частинок у попередньому сепараторі задля захисту газоочисного обладнання та компресорів); охолодження газової суміші (газ охолоджується у газоохолоджувачах або конденсаторах до температури 40–80 °С, волога і частина конденсату видаляються, залишається тільки суха газова фаза); компресія та тиск (газ піддається стадійній компресії для подачі на установки сепарації); газова сепарація: за рахунок фракційної абсорбції – видалення CO₂, H₂S, водяної пари, кріогенне розділення на пропілен, бутілен, метан, етан та селективна абсорбція (PSA, VSA, TSA) – отримання H₂ або C₂–C₄ в чистому вигляді; збір цільових компонентів: гази-алкани (C₁–C₄) подаються на виробництво теплової енергії до блоку генерації теплової енергії, а гази-олефіни (C₂–C₄) – на виробництво високооктанових оксигенатів до блоку синтезу оксигенатів.

Блок генерації теплової енергії в установках каталітичного піролізу горючих сланців призначений для використання теплової енергії від спалювання технологічного палива, побічних газів та коксу для підігріву блоку переробки, блоку регенерації каталізатору та адсорбенту, матеріальних потоків, а також для виробництва пари, гарячої води. Для отримання теплової енергії використовуються технологічне паливо – газ, мазут, гудрон, побічні гази алкани (C₁–C₄) з блоку розділення газів, H₂ або кокс. При цьому частина теплоти димових газів передається повітрю для сушіння або газу для підігріву каталізатора. Таким чином досягається зменшення витрати палива та підвищується енергетична ефективність установки. Димові гази, для зменшення викидів твердих частинок та CO₂, проходять циклон / пиловловлювач, скрубери / теплообмінники. Димові гази спрямовуються до блоку підготовки горючих сланців, а далі – до блоку генерації електричної енергії.

Блок синтезу оксигенатів призначений для перетворення легких олефінів (C₂–C₄) та спиртів (метанол, етанол) у високооктанові добавки до бензинів, спиртів та ефірів. Основні технологічні операції, які реалізуються у блоку – підготовка сировини (очищення від домішок води, сірки, кислот, компресія до робочого тиску реактора), синтез оксигенатів (див. рівняння 1-17), охолодження та конденсація продуктів (реакційна суміш охолоджується, конденсується рідка фаза – оксигенат), відокремлення і очистка (газова фаза – не прореаговані олефіни, водень, C₁–C₄ – повертається в реактор або надходить на спалювання, а рідка фаза проходить ректифікацію для відокремлення чистого оксигенату від залишків спирту чи розчинника, які повторно використовуються у синтезі), зберігання і підготовка до змішування з бензином (готові оксигенати подаються до блоку компаундування).

Блок очищення рідких продуктів піролізу активованим коксом зазвичай проектується як адсорбційний вузол, котрий працює за аналогією з промисловими адсорберами на активованому вугіллі. Основна мета цього блоку – вилучення поліциклічних ароматичних вуглеводнів, сірко- та азотовмісних домішок, а також смолистих компонентів, які погіршують якість фракцій (бензин, дизель, сировина для ароматичних вуглеводнів). Адсорбційне очищення відбувається шляхом наступних взаємопов'язаних технологічних операцій:

– Вхідна підготовка. Рідкі продукти піролізу (бензинова та важка фракція) надходять з блоку сепарації, після конденсації та грубого відділення води/газів; попередній підігрів до 40–70 °С для зниження в'язкості;

– Власне адсорбційна очистка. Реалізується в колонні (висота апарату 6–12 м, робочий тиск в апараті 0,3–0,6 МПа) з нерухомим шаром активованого коксу (товщина шару 1–3 м). Потік рідких продуктів рухається зверху донизу через шар коксу, а сірковмісні сполуки (тіолі, сульфіді), азотовмісні бази (піридини, хіноліни), а також високомолекулярні смолисті речовини адсорбуються на шарі коксу. Після такого очищення рідкі продукти характеризуються зниженим вмістом сірки (до 0,05–0,1 % мас.) та смол (0,1–0,5 % мас.) й є підготовленими для подальшої гідроочистки або виділення ароматичних вуглеводнів (бензолу, толуолу, ксилолів). Далі очищені рідкі продукти надходять до блоку фракціонування для розділення бензинової та важкої фракції.

Блок регенерації адсорбенту (активованого коксу) здійснює відновлення адсорбційної здатності коксу, насиченого сірковмісними, азотовмісними й смолистами сполуками. Основні стадії регенерації адсорбенту: осушення (продування інертним газом при 100–120 °С для видалення залишків рідини); термічна регенерація (подача гарячого азоту/пари (200–400 °С), що сприяє десорбції домішок); винос та конденсація (смолисті

речовини частково конденсуються у холодильнику, решта згоряє у факелі); охолодження шару (продування холодним газом при температурі 20–40 °С). Тривалість такої регенерації складає 4–12 год (залежить від ступеня забруднення). Частина адсорбенту деградує при кожному циклі (~3–5 % на рік), тому потрібне періодичне його вивантаження та поповнення свіжим активованим коксом. Димові гази, що утворюються при регенерації адсорбенту, доцільно спрямовувати до блоку генерації електричної енергії. Натомість підігріті випари з блоку генерації електричної енергії необхідно подавати до блоку регенерації адсорбенту.

Блок генерації теплової енергії призначений для забезпечення теплових потреб усієї технологічної установки: підігрів сировини, регенерація адсорбенту, підтримка робочих температур у колонних і реакторних агрегатах. Генерація електричної енергії здійснюється за рахунок встановлення котла-утилизатора для відбору тепла та парової турбіни. Також в цьому блоці можна реалізувати процес ORC. Джерелом тепла у даному випадку може бути гаряча пара від регенерації адсорбенту. Даний процес характеризується простою схемою, низькими температурами (працює навіть від 100–120 °С). Електричний ККД складає 12–20 %. Частина гарячої пари може бути використана в блоках активації та регенерації адсорбенту.

Блок фракціювання рідких продуктів піролізу горючих сланців має досить важливе значення, оскільки рідкі продукти представляють собою складну суміш вуглеводнів, смолистих речовин, фенолів, сірко- та азотовмісних домішок. Для подальшої переробки (гідроочистки, каталітичного крекінгу, виділення хімічної сировини) потрібне фракційне розділення. Основне призначення блоку – це розділення за температурами кипіння суміші рідких продуктів на гази (C₂–C₄), бензинову (C₅–C₁₂) та важку (C₁₂₊) фракції керосинової, дизельної та смоляної фракцій. Фракціювання здійснюється у ректифікаційній колоні (температура внизу колони – 320–360 °С, робочий тиск – 0,2–0,3 МПа) тарілчастого або насадочного типу. Вихід газів C₁–C₁ складає 5–10 %; бензинової фракції C₅–C₁₂ (межі википання 35–220 °С) при фракціюванні очищених рідких продуктів піролізу горючих сланців, в середньому становить 20–30 % мас., а важкої фракції C₁₂₊ (межі википання 220–400 °С) – приблизно 25–35 % мас. Далі бензинова фракція надходить до блоку компаундування, гази – до блоку генерації теплової енергії, а важка фракція – до блоку гідрокрекінгу.

Блок гідрокрекінгу призначений для розщеплення важких вуглеводнів (C₁₂₊) у легкіші фракції – бензиновий (C₅–C₁₂) і дизельний (C₁₂–C₁₅) діапазон – за присутності водню та каталізатора (NiMo/Al₂O₃, CoMo/Al₂O₃ або промотовані Zeolite-based). Даний процес реалізується у реакторі при температурі 350–450 °С і тиску 5–20 МПа та дозволяє отримати компоненти автомобіль-

ного бензину із важких піролізних фракцій. Серед особливостей проведення процесу слід виділити наступні: підтримка стабільного тиску і температури критична для селективності; надлишок водню зменшує утворення коксу і смол; метали (Ni, V) у сировині можуть «отруювати» каталізатор, тому попереднє очищення обов'язкове; можлива рециркуляція водню через компресор та сепаратори. Вихідними продуктами гідрокрекінгу є легкі бензинові компоненти C₅–C₁₂ (~40–50 % від важкої фракції), середні дизельні компоненти C₁₂–C₁₅ (~30–40 %); важкі залишки – 10–20 %; водень – повертається у цикл. Цільовий продукт – бензинова фракція гідрокрекінгу – надходить до блоку компаундування.

Блок компаундування призначений для підготовки кінцевого продукту – товарного автомобільного бензину – шляхом змішування бензинових фракцій, компонентів та оксигенатних добавок, забезпечуючи необхідні фізико-хімічні властивості (стійкість до детонації, фракційний склад, стабільність, мийні властивості тощо). Технологічний процес компаундування складається з наступних операцій: подача базової фракції у змішувальний резервуар; дозування й додавання компонентів бензину та добавок; активне перемішування при заданій температурі; контроль фізико-хімічних властивостей і корекція складу (за необхідності); вивантаження готового продукту у резервуари готової продукції або відправка на фасування/транспортування. До особливостей процесу компаундування можна віднести те, що висока однорідність суміші критична для якості кінцевого продукту, а для термостійких або високов'язких компонентів потрібен підігрів перед змішуванням.

Блок системи керування призначений для моніторингу, контролю та автоматизації всіх технологічних процесів на установці піролізу. Він забезпечує: автоматичний контроль параметрів технологічного процесу (тиску, температури, витрат, рівнів рідин); регулювання режимів роботи обладнання у реальному часі; захист від аварійних ситуацій: перевищення тиску, температури, витоків газів або рідких продуктів; реєстрацію та архівування даних для аналізу ефективності установки, візуалізацію процесу, сповіщення, дистанційне керування. Основними елементами блоку можна вважати: контролери PLC / DCS; сенсори та датчики; виконавчі механізми; інтерфейс оператора (НМІ); систему збору і архівування даних. Дана система живиться як за рахунок електричної енергії від державних розподільних систем, так і від власної електричної енергії, яка надходить з блоку генерації електричної енергії.

Висновки

Великі поклади горючих сланців в Україні (Кременецьке, Олександрійське, Львівсько-Волинське родовища) та зростаюча імпортозалежність щодо енергорес-

сурсів, спричиняють перспективність розвинення та впровадження у промисловість технології переробки горючих сланців, спрямованої на отримання компонентів автомобільних бензинів.

На сьогоднішній день одним з перспективних процесів переробки горючих сланців в компоненти автомобільних бензинів вважається каталітичний піроліз, який реалізується при температурах 380–500 °С, тисках 0,1–1,0 МПа (залежно від типу каталізатора і схеми процесу).

На підставі проведених теоретичних досліджень встановлено, що, зважаючи на масовий вихід та хімічний склад отриманих продуктів, основними типами каталізаторів, котрі доцільно використовувати при каталітичному піролізі горючих сланців, виступають цеоліти (HZSM-5, Y), Al₂O₃, NiMo/Al₂O₃, Ga-ZSM-5.

Запропоновано принципову енергоефективну схему переробки горючих сланців в компоненти автомобільних бензинів, яка має блочну структуру та базується на принципах інтеграції процесів, рекуперації тепла, використання побічних продуктів та відходів виробництва у технологічному процесі. Данна схема передбачає, що: вуглеводневі гази-алкани (C₁–C₄) використовуються для отримання теплової енергії; гази-олефіни (C₂–C₄) використовуються для синтезу високооктанових оксигенатних добавок до бензину; важка фракція (C₁₅₊) – для виробництва бензинової фракції шляхом її гідрокрекінгу; димові гази – для генерації електричної енергії, виробництва водяної пари та гарячої води, кокс – для виробництва адсорбентів, які в подальшому використовуються при очищенні рідких продуктів піролізу – сланцевої нафти.

У умовах високої залежності від імпорту нафти та нафтопродуктів горючі сланці можуть стати страховим джерелом енергії, а їх енергоефективна переробка на компоненти автомобільних бензинів у довгостроковій перспективі сприятиме зміцненню енергетичної незалежності України.

Бібліографічний список

1. Зур'ян О.В. Показники запасів і видобутку горючих корисних копалин в Україні за період 2013–2018 років з позицій технічного аналізу / О.В. Зур'ян, А.Ф. Ляшок // *Мінеральні ресурси України*. – 2019. – №3. – С. 30–39.

2. Горючі корисні копалини України та їхня геолого-економічна оцінка : підручник / В.А. Михайлов, О.М. Карпенко, М.М. Курило [та ін.]. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2018. – 655 с.

3. *Energy resources of geological environment in Ukraine (state and prospects) : in 2 vol. / edited by G.I. Rudko*. – Chernivtsi: Bukrek, 2014. – Vol. 2. – 520 p.

4. Крупський Ю.З. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України : монографія: у 8 кн. Кн. 2 : Західний наф-

тогазоносний регіон / Ю.З. Крупський, І.М. Куровець, Ю.М. Сеньковський [та ін.]. – К.: Ніка-Центр, 2014. – 400 с.

5. Саранчук В.І. Основи хімії і фізики горючих копалин / Саранчук В.І., Ільшиов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 640 с.

6. Гафич І.П. Оцінка перспектив видобування горючих сланців та пошуку покладів вуглеводнів, водню, гелію на Бовтиській імпактній структурі / І.П. Гафич, Н.С. Довбиш // *Мінеральні ресурси України*. – 2024. – № 4. – С. 34–41. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.4.34-41>.

7. Брик Д. Некондиційні вуглецевмісні горючі копалини та способи їхнього термохімічного перероблення / Д. Брик, М. Подольський, Ю. Хоха, О. Любчак, Л. Кульчицька-Жигайло, О. Гвоздевич // *Геологія і геохімія горючих копалин*. – 2021. – № 1-2 (183–184). – С. 89–109. <https://doi.org/10.15407/ggcm2021.01-02.089>.

8. Chi Xiong. Pyrolysis characteristics and mechanism of oil shale in the Songliao Basin of China / Chi Xiong, Jingyu Chen, Ruina Xu, Qiang Song // *Fuel*. – 2025. – Vol. 386. – 134251. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134251>.

9. Yixiang Shu. Study on pyrolysis of ultra-high-quality oil shale: product characterization and a utilization process / Yixiang Shu, Bin Liu, Hanlin Zhang, Zhaochen Shi, Ao Zhou, Daoyang Ma, Zhongfa Hu, Milan Vujanović, Xuebin Wang // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2024. – Vol. 46. – Is. 1. – P. 8132–8143. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2368504>.

10. Fajun Zhao. The effect of temperature on pyrolysis products during oil shale thermal decomposition / Fajun Zhao, Zian Yang, Lei Zhang, Changjiang Zhang, Tianyu Wang & Hong Zhang // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – 26135. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11050-6>.

11. Bin Nie. Study on thermal decomposition of oil shale: Two-phase fluid simulation in wellbore / Bin Nie // *Energy*. – 2023. – Vol. 272. – 127124. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127124>.

12. Hakimi, M.H. High sulphur oil of Type II kerogen of the oil shales from Western Central Jordan based on molecular structure and kinetics / Hakimi, M.H., Alqudah, M., Mustapha, K.A. [et al.] // *Sci Rep*. – 2024. – Vol. 14. – 19033. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68416-5/>

13. Min Han. Effect of Lewis/Brønsted acid sites in HZSM-5 zeolite on the selectivity of para-xylene during methylation of toluene with methanol / Min Han, Zhongzhong Xue, Lixia Ling, Riguang Zhang // *Molecular Catalysis*. – 2021. – Vol. 509. – 111622. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111622>.

14. Andrea Zachariou. Counting the Acid Sites in a Commercial ZSM-5 Zeolite Catalyst / Andrea Zachariou, Alexander P Hawkins, Russell F Howe, Janet M S

Skakle, Nathan Barrow, Paul Collier, Daniel W Nye, Ronald I Smith, Gavin B G Stenning, Stewart F Parker, David Lennon // *ACS Phys Chem Au.* – 2022. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 74–83. <https://doi.org/10.1021/acspchemau.2c00040>.

15. Daligaux V. Deactivation by coking of industrial ZSM-5 catalysts used in LDPE pyrolysis and regeneration by ozonation process – Bench scale studies / **V. Daligaux, R. Richard, M. Marin-Gallego, V. Ruaux, L. Pinard, M.-H. Manero** // *Applied Catalysis A: General.* – 2024 – Vol. 671. – P. 119581. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2024.119581>.

16. Ifeanyi Michael Smarte Anekwe. Influence of metal doping on the coke formation of a novel hierarchical HZSM-5 zeolite catalyst in the conversion of 1-propanol to fuel blendstock / **Ifeanyi Michael Smarte Anekwe, Yusuf Makarfi Isa** // *RSC Advances.* – 2025. – Vol. 15. – Iss. 6. – P. 3988-3999. <https://doi.org/10.1039/d4ra07707e>.

17. Trejo F. CoMo/MgO–Al₂O₃ supported catalysts: An alternative approach to prepare HDS catalysts / **Trejo F., Mohan S Rana, Jorge Ancheyta** // *Catalysis Today.* – 2008. – Vol. 130. – Iss. 2. – P. 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.10.105>.

18. Safariyatul Mahmudah. Synthesis and characterization of Fe₂O₃/CaO derived from Anadara Granosa for methyl ester production / **Safariyatul Mahmudah, Mohd Lokman Ibrahim, Izham Saiman, Yun Hin Taufiq-Yap** // *Energy Conversion and Management.* – 2016. – Vol. 126. – P. 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.072>.

19. McCabe R.W. Clay Minerals as Catalysts / **R.W. McCabe, J.M. Adams** // *Developments in Clay Scienc.* – 2013. – Vol. 1. – P. 491-538. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098259-5.00019-6>.

20. Mitchell Juneau. Characterization of Metal-zeolite Composite Catalysts: Determining the Environment of the Active Phase / **Mitchell Juneau, Renjie Liu, Yikang Peng, Akhilesh Malge, Zhiqiang Ma, Marc D. Porosoff** // *ChemCatChem.* – 2020. – Vol. 12. – Issue 7. – P. 1826-1852. <https://doi.org/10.1002/cctc.201902039>.

21. José C. Jiménez-García. A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles / **José C. Jiménez-García, Alexis Ruiz, Alejandro Pacheco-Reyes, Wilfrido Rivera** // *Processes.* – 2023. – Vol. 11. – Iss. 7. – P. 1982. <https://doi.org/10.3390/pr11071982>

22. Rosaângela da Silva. Effect of additives on the anti-knock properties and Reid vapor pressure of gasoline / **Rosaângela da Silva, Renato Catalun, Eliana Weber de Menezes, Dimitrios Samios, Clarisse M. Sartori Piatnicki** // *Fuel.* – 2005. – Vol. 84. – P. 951–959. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.01.008>.

23. Rodney A. Fernandes. Recent advances in Wacker oxidation: from conventional to modern variants and applications / **Rodney A. Fernandes, Amit K. Jha, Praveen Kumar** // *Catalysis Science & Technologie.* – 2020. – Vol. 10. – P. 7448-7470. <https://doi.org/10.1039/D0CY01820A>.

24. Franz Schmidt. HPPO Process Technology A novel route to propylene oxide without coproducts / **Franz Schmidt, Evonik Industries, Maik Bernhard, Evonik Industries, Heiko Morell, Matthias Pascaly** // *Chimica Oggi - Chemistry Today.* – 2014. – Vol. 32. – Iss. 2. – P. 31-35.

25. Wenguang Duan. Innovation and application of an automatic control system for gas wells production in sulige gas field / **Wenguang Duan, Gang Chen** // *Journal of Physics Conference Series.* – 2018. – Vol. 1074. – P. 012123. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1074/1/012123>.

26. Tarakhtiy O. Automated control of a cogeneration plant using non-certified types of gaseous fuel / **O. Tarakhtiy, V. Zhukovskiy, A. Ivaneiev, O. Yavorskiy, D. Shuvalov** // *International Science Journal of Engineering & Agriculture.* – 2023. – Vol. 2. – Iss. 5. – P. 9–19. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230205.02>.

27. Dharmendra Hariyani. A literature review on waste management treatment and control techniques / **Dharmendra Hariyani, Poonam Hariyani, Sanjeev Mishra, Milind Kumar Sharma** // *Sustainable Futures.* – 2025. – Vol. 9. – P. 100728. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100728>.

Рукопис надійшов до редакції 01.09.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-51-64

Specialty 161. U.D.C. 665.633

OBTAINING COMPONENTS OF AUTOMOTIVE GASOLINES BASED ON PRODUCTS OF OIL SHALE PROCESSING

© **K.V. Shevchenko¹, A.B. Grigorov²**

National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute' (NTU 'KhPI'), 61002, Kharkiv, 2 Kirpichova Street, Ukraine

¹ Shevchenko Kirill Volodymyrovych, Ph.D. in technical sciences, doctoral student at the Department of Oil, Gas and Solid Fuel Processing Technologies (DOGSFPT), e-mail: drekstar2007@gmail.com

² Andriy Borysovych Grygorov, Doctor of Technical Sciences, Prof., Prof. of the DOGSFPT, e-mail: grigorovan-drey@ukr.net



The article considers the fundamental possibility of using Ukraine's combustible shale as an additional source of raw materials for the production of automotive gasoline components. It is shown that a number of significant factors contribute to the use of oil shale in the technological process of producing automotive gasoline components. First, Ukraine has significant deposits of oil shale, represented by the Kremenets, Oleksandriya, and Lviv-Volyn fields. Secondly, the need to significantly reduce Ukraine's dependence on energy imports necessitates the diversification of existing (traditional) sources of hydrocarbon raw materials through the use of available alternative sources. These sources can include secondary resources, by-products and combustible minerals (e.g. oil shale) that were not previously used as sources of hydrocarbon raw materials. Based on this, the article proposes the use of catalytic pyrolysis technology (temperature 380–500 °C, pressure 0.1–1.0 MPa and zeolite catalyst) for the processing of oil shale into automotive gasoline components. Based on theoretical studies, an energy-efficient scheme for processing combustible shale into components of automotive gasoline has been developed, consisting of separate, interconnected technological units. This scheme allows by-products in the form of hydrocarbon gases – alkanes (C_1 – C_4) – to be converted into thermal energy; gases – olefins (C_2 – C_4) – into high-octane oxygenated additives for motor gasoline. At the same time, the liquid heavy fraction (C_{15+}) should be used as raw material for hydrocracking aimed at obtaining a base petrol fraction. Implementing the principles of heat recovery, production waste – flue gases – should be used to generate electricity, produce steam and hot water, and coke should be used to produce adsorbents, which can then be used to purify liquid pyrolysis products – shale oil or gasoline fractions extracted from it.

Keywords: combustible shale, technological processing, motor gasoline, catalytic pyrolysis, hydrocarbon gases, synthesis, oxygenates, gasoline fraction, compounding.

Corresponding author: A.B. Grigorov, e-mail: grigorovandrey@ukr.net
Manuscript received 2025/09/01

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-64-68

Спеціальність 161. УДК 662.741.3

ОЦІНКА СОБІВАРТОСТІ ВИРОБНИЦТВА КОКСУ ЗА ПЕРЕРОБКИ ШИХТ З РІЗНИМИ СУПУТНИМИ ПРОДУКТАМИ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ

© Є.І. Котляров¹

Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (НДЦ ІПР), 61166, м. Харків, пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Україна

О.Л. Борисенко², І.В. Шульга³

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

¹ Котляров Євген Іванович, канд. економ. наук, доц., зав. сектору енергетичної безпеки та енергозбереження, e-mail: ekotlarov@i.ua

² Борисенко Олександр Людвинович, канд. техн. наук, с.н.с., в.о. директора, e-mail: zd@ukhin.org.ua

³ Шульга Ігор Володимирович, канд. техн. наук, доц., с.н.с., зав. коксового відділу, e-mail: ko@ukhin.org.ua

Виконаними нами раніше дослідженнями показаний позитивний вплив на якість коксу додавання до вугільної шихти низки супутніх продуктів переробки вугілля: відходів вуглезбагачення, коксового дрібняку та кам'яновугільної смоли. Техніко-економічний аналіз засвідчив, що додавання до шихти супутніх продуктів переробки вугілля (окрім смоли кам'яновугільної) дозволяє знизити виробничу собівартість коксу. При цьому таке зниження є більшим, аніж зростання витрат на кокс в доменному виробництві. Тому отримані результати підтверджують необхідність техніко-економічного обґрунтування кількості та складу супутніх продуктів переробки вугілля, які додаються до шихти і не призводять до збільшення витрат у доменному виробництві. Оцінка зміни

техніко-економічних показників виробництва коксу за додавання до шихти окремих супутніх продуктів переробки вугілля дозволяє зробити висновок, що найбільш економічно привабливими є варіанти, за якими до вугільної шихти додаються відходи вуглезбагачення та/або коксовий дрібняк. Згідно з цим напрямком подальших досліджень має стати оптимізаційне моделювання складу вугільної шихти для коксування з додаванням супутніх продуктів переробки вугілля, яке не призводить до збільшення собівартості виробництва чавуну. При цьому найбільш привабливим є сумісне додавання до шихти коксового дрібняку та відходів вуглезбагачення. Наявність в останніх певної спільної здатності, що оцінюють за методом Рога, дозволяє досягти синергетичного ефекту, завдяки якому і вихід, і якість отриманого коксу одночасно поліпшуються в найбільшому ступені. Отримані результати можуть бути використані в першу чергу в роботі металургійних комбінатів, до складу яких згідно з п. 2.2 ПТЕ-2017 входять коксохімічні виробництва.

Ключові слова: коксохімічне виробництво, супутні продукти, якість коксу, вихід коксу, витрата коксу в доменному виробництві.

Автор для листування С.І. Котляров, e-mail: ekotlarov@i.ua

Метою дослідження є обґрунтування можливості економічно ефективного отримання коксу прийнятної якості з вугільних шихт із додаванням супутніх продуктів підготовки вугілля та його коксування.

Виконаними нами раніше дослідженнями показаний позитивний вплив на якість коксу додавання до вугільної шихти низки супутніх продуктів переробки вугілля: відходів вуглезбагачення, коксового дрібняку та кам'яновугільної смоли [1]. Тому завданням, що вирішується на даному етапі дослідження, є техніко-економічний аналіз впливу кількості внесених до шихти добавок різної природи на вихід, показники якості отриманого коксу, витрату його в доменному виробництві та визначення на підставі цього раціональних кількостей добавок різних типів, які додаються до шихти.

Додавання до вугільної шихти різних супутніх продуктів переробки вугілля змінює такий її якісний показник, як вихід летких речовин. Це, в свою чергу, призводить до зміни матеріального балансу процесу і, таким чином, впливає на зміну техніко-економічних показників – рис. 1.



Рис. 1. Вплив додавання до шихти супутніх продуктів переробки вугілля на техніко-економічні показники виробництва коксу

Джерело: складено авторами.

Кількісна оцінка змін техніко-економічних показників виробництва коксу може бути здійснена, виходячи з наступного.

1. Використання як сировини для коксування окремих супутніх продуктів переробки вугілля змінює собівартість шихти, виходячи з вартісної оцінки компонентів, що додаються. При цьому смола кам'яновугільна та коксовий дрібняк оцінюються за виробничою собівартістю, яка визначається за прийнятою на підприємстві методикою

внутрішньогосподарського обліку. Відходи вуглезбагачення пропонується оцінювати на рівні витрат на їх підготовку до використання, включаючи витрати на вилучення з місць зберігання та транспортування до місця додавання у шихту, якщо на підприємстві не встановлено інший порядок.

Зміну виробничої собівартості 1 т шихти (ΔC_1) за додавання супутніх продуктів пропонується розраховувати за формулою:

$$\Delta C_1 = 3BB(d_1 - 1) + КДd_2 + СКd_3 + ВВ3d_4, \quad (1)$$

де 3ВВ – заготівельна вартість вугілля, грн/т;

КД – виробнича собівартість коксового дрібняку, грн/т;

СК – виробнича собівартість смоли кам'яновугільної, грн/т;

ВВ3 – вартісна оцінка відходів вуглезбагачення, грн/т;

d_1, d_2, d_3, d_4 – частка в шихті, що спрямовується на коксування, відповідно вугілля, коксового дрібняку, смоли кам'яновугільної, відходів вуглезбагачення, в частках одиниці.

Згідно з матеріальним балансом процесу приготування шихти:

$$d_1 + d_2 + d_3 + d_4 = 1. \quad (2)$$

Зміна виробничої собівартості 1 т валового коксу внаслідок додавання до шихти супутніх продуктів розраховується за формулою:

$$\Delta CK_1 = \frac{\Delta C_{ш}}{B_K} \cdot 100, \quad (3)$$

де B_K – вихід валового коксу від шихти, %.

2. Додавання до шихти супутніх продуктів переробки вугілля змінює вихід летких речовин із шихти, що спрямовується на коксування. Збільшення (зменшення) виходу летких речовин із шихти на 1 % призводить до зменшення (збільшення) виходу валового коксу на 0,7 % [2]. Зміна виходу валового коксу у % може бути визначена за формулою:

$$\Delta BK_i = (V_6^d - V_i^d) \times 0,7, \quad (4)$$

де V_6^d – вихід летких речовин з базової шихти, тобто без додавання супутніх продуктів переробки вугілля, в нашому випадку за даними [1] приймаємо на рівні 28,8 %;

V_i^d – вихід летких речовин з шихти i -го варіанту, %.

3. Зміна виробничої собівартості за рахунок умовно-постійних витрат розраховується за формулою:

$$\Delta CK_2 = УПВ \left(\frac{B_K}{B_K + \Delta B_K} - 1 \right), \quad (5)$$

де УПВ – сума умовно-постійних витрат в базовому варіанті, грн/т валового коксу;

B_K – вихід валового коксу за базовим варіантом шихти, %.

В розрахунку на 1 т валового коксу зміна його виробничої собівартості може бути визначена сумою:

$$\Delta CK_{заг} = \Delta CK_1 + \Delta CK_2. \quad (6)$$

Отже, якщо виробнича собівартість валового коксу зменшується (тобто $\Delta CK_{заг} < 0$), то це свідчить про економічну доцільність додавання до шихти супутніх продуктів переробки вугілля.

Таблиця 1

Вихідні дані, необхідні для оцінки зміни собівартості

Показники та одиниці виміру	Числові значення
Вартість доменного коксу, грн/т	4175
Виробнича собівартість коксу за умовної рентабельності 10 %, грн/т	3800
Частка вартості шихти у собівартості коксу, %	85,0-92,5
Вартість шихти, грн/т коксу	3380
Витрати за переділом у коксовому цеху, грн/т	420
Частка умовно-постійних витрат за переділом, %	53,8-71,0
Умовно-постійні витрати, грн/т коксу	275
Вихід коксу з базового варіанту шихти (без додавання супутніх продуктів, %)	74,0
Вартість 1 т шихти, грн	2570
Частка вартості вугілля у собівартості шихти, %	97,0-98,0
Вартість вугілля, що витрачається на виробництво 1 т шихти, грн	2500

Дані, що необхідні для виконання цих розрахунків (зокрема, щодо структури виробничої собівартості коксу та продуктів, які додаються до шихти), мають конфіденційний характер. Тому проілюструвати запропонований підхід до оцінки змін виробничої собівартості можливо, використовуючи експертні оцінки, які містяться в 3-му виданні «Довідника коксохіміка» [2] та даних Державної служби статистики [3]. Для подальшої оцінки виробничої собівартості коксу і кам'яновугільної смоли використані статистичні дані про експорт коксохімічної продукції у 2020 р., наявні у вільному доступі [3]. Розрахунки, виконані на підставі цих даних, свідчать, що в 2020 р. середньозважені експортні ціни склали:

– коксу доменного – 150 \$/т;

– смоли кам'яновугільної – 147,5 \$/т.

За валютного курсу на кінець 2020 р. 27,828 грн/\$ ціни цих продуктів в національній валюті склали відповідно 4175 грн/т та 4100 грн/т. Для подальших розрахунків приймаємо ціну коксового дрібняку на рівні ≈ 25 % від ціни доменного коксу – 1040 грн/т. Вартість відходів вуглезбагачення умовно прийнята на рівні 100 грн/т.

Інші дані, необхідні для розрахунків, зведені у табл. 1 у відповідності до матеріалів [2].

В табл. 2 наведено розрахунок зміни собівартості валового коксу за різних варіантів додавання до шихти супутніх продуктів. Як свідчать ці дані, додавання до шихти супутніх продуктів переробки вугілля для коксохімічного виробництва є економічно доцільним у випадку, коли виробнича собівартість

цих продуктів нижча, аніж заготівельна вартість вугілля. В розглядуваному випадку (заготівельна вартість вугілля 2500 грн/т) такими супутніми продуктами є відходи вуглезабагачення з оцінкою 100 грн/т та коксовий дрібняк з виробничою собівартістю 1040 грн/т.

Таблиця 2

Оцінка впливу на виробничу собівартість коксу додавання до шихти супутніх продуктів переробки вугілля

Варіант	Кількість доданих супутніх продуктів, %			Вихід легких речовин, %		Зміна виходу коксу в порівнянні з базовим варіантом	Зміна виробничої собівартості коксу, грн/т		
	Відходи вуглезабагачення	Дрібняк коксовий	Смола кам'яновугільна	V^l	Зміна в порівнянні з базовим варіантом (14)		Внаслідок додавання супутніх продуктів ΔSK_1	Внаслідок умовно-постійних витрат ΔSK_2	Разом $\Delta SK_{\text{зар}}$
1	5,0	-	3,0	30,5	+1,7	-1,19	-106,72	+3,42	-103,30
2	5,0	-	-	28,5	-0,3	+0,21	-162,58	+0,71	-161,87
3	5,0	3,0	-	28,0	-0,8	+0,56	-163,80	-1,81	-165,61
4	5,0	3,0	3,0	29,5	+0,7	-0,49	-121,80	+2,36	-119,44
5	5,0	1,5	1,5	29,1	+0,3	-0,21	-130,90	+0,78	-130,12
6	-	1,5	-	29,8	+1,0	-0,70	-21,90	+1,31	-20,59
7	-	1,5	3,0	29,6	+0,8	-0,56	+20,10	+0,78	+20,88
8	-	-	1,5	29,4	+0,6	-0,42	+21,00	+0,26	+21,26
9	-	3,0	1,5	29,0	+0,2	-0,14	-22,80	-1,04	+23,84
10	10,0	1,5	-	28,3	-0,5	+0,35	-261,90	0,00	-261,90
11	10,0	1,5	3,0	28,9	+0,1	-0,07	-219,90	+1,57	-218,33
12	10,0	-	-	28,8	0	0	-240,00	+2,63	-237,37
13	10,0	3,0	1,5	28,4	-0,4	+0,28	-262,80	+0,26	-262,54
14	-	-	-	28,8	0	0	0	0	0

За прийнятих для розрахунку умов додавання до шихти кам'яновугільної смоли не є економічно доцільним як внаслідок її високої виробничої собівартості, так і високого виходу легких речовин, який призводить до зменшення виходу коксу. Цей висновок підтверджується тим, що найбільше зниження собівартості коксу спостерігається у варіантах № 2, 3, 10, 12, в яких до шихти не додавали кам'яновугільну смолу, а додавання відходів вуглезабагачення та/або коксового дрібняку призвело до зменшення собівартості коксу на 4,3-6,9 %.

Вибір раціонального складу супутніх продуктів, які додаються до шихти, може бути зроблений за умови врахування економічних показників доменного виробництва. Відомо, зокрема, що підвищення (погіршення) такого показника якості, як стиранність коксу M_{10} , призводить до збільшення питомих витрат коксу на виплавку 1 т чавуну на 2,6 %. В свою чергу, таке погіршення якості призводить до того, що витрати на придбання коксу зростають на ті ж самі 2,6 %.

Отже, для визначення економічної доцільності додавання до вугільної шихти певного супутнього продукту треба порівняти величини зниження собівартості коксу зі збільшенням витрат на кокс у доменному виробництві. В розглядуваному прикладі (зокрема, варіанти 10-12 з додаванням переважно відходів вуглезабагачення) зниження собівартості коксу складає 6,2-6,9 %. Однак одночасно при цьому погіршується і якість коксу за показником M_{10} , що збільшує витрати на кокс у до-

менному виробництві на 2,6 % на кожен відсоток збільшення цього показника.

Тобто, якщо за додавання до шихти відходів вуглезабагачення в кількості 10 % виробнича собівартість зменшується на 6,2 %, то одночасно, згідно з вищенаведеним, показник якості M_{10} збільшується на 0,6 %, відповідно витрати на кокс у доменному виробництві зростають на 1,6 %. Порівняння зниження виробничої собівартості коксу на 6,2 % зі збільшенням витрат на нього лише на 1,6 % свідчить про зниження собівартості чавуну.

Це визначає можливий напрямок подальшого проведення досліджень, а саме – побудову оптимізаційної моделі додавання до вугільної шихти супутніх продуктів переробки вугілля, які не призводять до збільшення собівартості виробництва чавуну. Як критерій оптимізації в цій моделі може використовуватись зміна собівартості чавуну, а як обмеження – вимоги нормативно-технічної документації щодо якості коксу, наявність в доменному виробництві технології вдування пиловугільного палива, оцінка вартості супутніх продуктів переробки вугілля, що додаються до шихти.

Висновки

1. Розглянута зміна техніко-економічних показників виробництва коксу за переробки шихт з додаванням супутніх продуктів переробки вугілля: кам'яновугільної смоли, коксового дрібняку та смоли кам'яновугільної.

2. Встановлено, що найбільш економічно привабливим є додавання до шихти відходів вуглезбагачення та/або коксового дрібняку. Виробнича собівартість коксу при цьому знижується на 4,3-6,9 %.

3. В той же час додавання зазначених продуктів призводить до погіршення міцнісних показників якості коксу і, відповідно, до зростання у доменному виробництві витрати коксу на виплавку чавуну як в натуральній, так і в грошовій формі.

4. Напрямою подальших досліджень має стати оптимізаційне моделювання складу шихти із додаванням супутніх продуктів переробки вугілля, яке не призводить до збільшення собівартості виробництва чавуну.

Бібліографічний список

1. **Борисенко О.Л.** Властивості коксу з вугільних шихт із різними супутніми продуктами переробки вугілля / **О.Л. Бори-**

сенко, І.В. Шульга, Ю.В. Телешев, Є.І. Котлярів // Вуглехімічний журнал. – 2025. – № 5. – С. 32-41 <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2025-0-5-32-41>.

2. **Котлярів Є.І.** Економіка вуглепідготовчих цехів та вуглезабагачувальних фабрик. Економіка коксових цехів / **Є.І. Котлярів, Л.А. Долгарева, Л.С. Чефранова, А.А. Болжельарський.** [під ред. **І.В. Шульги**] / Довідник коксохіміка. 3-тє вид. Т. 6. Економіка коксохімічного виробництва. Розд. 18, 19. – Харків: ВД ІНДЖЕК, 2010. – С. 167-188.

3. Державна служба статистики України. Зовнішня торгівля окремими видами товарів за країнами світу / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2024/zd/e_iovt/arh_iovt2024.htm.

Рукопис надійшов до редакції 22.09.2025

DOI: 10.31081/1681-309X-2025-0-6-64-68

Specialty 161. U.D.C. 662.741.3

ASSESSMENT OF THE COST OF COKE PRODUCTION FROM THE PROCESSING OF MIXTURES WITH VARIOUS CO-PRODUCTS OF COAL PROCESSING

© **Ye.I. Kotlyarov**¹

Research Centre for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1a Inzheneryi lane, Kharkiv, 61166, Ukraine

O.L. Borysenko², **I.V. Shulga**³

STATE ENTERPRISE 'UKRAINIAN STATE RESEARCH INSTITUTE FOR CARBOCHEMISTRY (UKHIN)', 61023, Kharkiv, 7 Vesnina St., Ukraine

¹ Kotlyarov Yevhen Ivanovych, Ph.D. in Economics, Associate Professor, Head of the Energy Security and Energy Conservation Sector, e-mail: ekotlarov@i.ua

² Borysenko Oleksandr Lyudvikovich, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Acting Director, e-mail: zd@ukhin.org.ua

³ Shulga Igor Volodymyrovych, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Head of the Coke Department, e-mail: ko@ukhin.org.ua

Our previous research has shown that adding a number of coal processing by-products to the coal charge has a positive effect on coke quality: coal enrichment waste, coke fines and coal tar. A technical and economic analysis has shown that adding coal processing by-products (except for coal tar) to the charge reduces the production cost of coke. At the same time, this reduction is greater than the increase in coke costs in blast furnace production. Therefore, the results obtained confirm the need for a technical and economic justification of the quantity and composition of coal processing by-products that are added to the charge and do not lead to an increase in costs in blast furnace production.

An assessment of changes in the technical and economic indicators of coke production when adding certain coal processing by-products to the charge allows us to conclude that the most economically attractive options are those in which coal enrichment waste and/or coke fines are added to the coal charge. According to this direction, further research should focus on optimising the modelling of coal charge composition for coking with the addition of coal processing by-products, which does not lead to an increase in the cost of pig iron production. In this case, the most attractive option is the combined addition of coke fines and coal enrichment waste to the charge. The presence of a certain caking ability in the latter, assessed using the Roga method, allows a synergistic effect to be achieved, thanks to which both the yield and the quality of the coke obtained are simultaneously improved to the greatest extent.

The results obtained can be used primarily in the work of metallurgical plants, which, according to clause 2.2 of PTE-2017, include coke chemical production.

Keywords: coke chemical production, by-products, coke quality, coke yield, coke consumption in blast furnace production.

Corresponding author: **E.I. Kotlyarov**, e-mail: ekotlarov@i.ua

Manuscript received 2025/09/22



Вуглехімічний журнал видається з 1993 р.

ДП «УХІН» зареєстровано суб'єктом у сфері друкованих медіа Рішенням № 1389
Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
(протокол № 27 від 16.11.2023 р.)
Ідентифікатор медіа R30-01930

Друкується згідно з рекомендацією вченої ради ДП «УХІН»,
протокол № 4 від 14.11.2025 р.

Відповідальний за випуск Чешко Ф.Ф.

Набір тексту та макет Званчук-Малік В.Г.

Ціна договірна

Підписано до друку 08.12.2025 р. Формат 60×84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Друк офсетний.

Облік.-видавн. арк. 7,91. Умовн. друк. арк. 7,90. Наклад 150 прим. Зам. № 25-72.

Адреса редакції: ДП «УХІН», вул. Весніна, 7, Харків, 61023, Україна.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців і
розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 6879 від 21.08.2019 р.

Тел., факс: (057) 704-1323,

e-mail: post@ukhin.org.ua

Друк ТОВ «Майдан»,

61002, Харків, вул. Чернишевська, 59, E-mail: maydan.stozhuk@gmail.com

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців і
розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 1002 від 31.07.2002 р.

За зміст статей відповідальність несуть автори



УХІН