

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ГАЗИФІКАЦІЇ КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СИНТЕТИЧНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ

©2024 ШУЛЬГА І. В., КИЗИМ М. О., ХАУСТОВА В. Є., КОТЛЯРОВ Є. І.

УДК 669+662.73+338.28
JEL: L60; L70

**Шульга І. В., Кизим М. О., Хаустова В. Є., Котляров Є. І. Методичний підхід до обґрунтування способу
газифікації кам'яного вугілля для виробництва синтетичних моторних палив**

Метою статті є обґрунтування найбільш придатного способу газифікації українського кам'яного вугілля для подальшого отримання синтетичного моторного палива. Для цього обґрунтування розроблено методичний підхід, використання якого дозволило отримати такі результати. Як сировинна база в статті рекомендовано довгополум'яне вугілля Західного Донбасу, розташованого на території Дніпропетровської області, де діють потужні підприємства з видобутку та збагачення вугілля. Проаналізовано найбільш розповсюджені у світі способи газифікації вугілля: Lurgi (протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) у стаціонарному шарі), Siemens (прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля), Техасо (прямоточна киснева газифікація в потоці водо-вугільної пульпи). Для кожного з цих способів розроблено матеріальні баланси, оцінено склад і якість отриманого генераторного газу, можливості організації виробництва необхідних енергоресурсів, рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу та скиду стічних вод. Запропоновано методику розрахунку складу генераторного газу, яка враховує склад дуття (вміст кисню, водяної пари або води). Усі розрахунки виконано для підприємства з потужністю по вугіллю 550 тис. т робочої маси на рік. На підставі проведених розрахунків та зіставленні їх результатів для промислового впровадження рекомендовано спосіб Техасо. Перевагами цього способу є: відсутність стадії отримання пари для газифікації, дефіцитність водного циклу, що практично виключає утворення стічних вод, і можливість використання для газифікації забрудненої води з інших джерел; найбільший сумарний вміст в отриманому синтез-газі водню та оксиду вуглецю; максимальна освоєна потужність виробничих реакторів та найбільша кількість потужностей, які створюються у світі саме за цією технологією; утилізація тепла отриманого газу для одержання великої кількості електричної та теплової енергії.

Ключові слова: синтетичне моторне паливо, кам'яне вугілля, спосіб газифікації, технічні параметри газифікації, генераторний газ, енергетичні потреби, матеріальні та енергетичні баланси, енергоресурси.

Рис.: 2. **Табл.:** 5. **Формул.:** 6. **Бібл.:** 10.

Шульга Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, завідувач коксового відділу «Українського державного науково-дослідного вуглехімічного інституту (УХІН)» (вул. Весніна, 7, Харків, 61023, Україна)

E-mail: ko@ukhin.org.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9389-2690>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004957016>

Кизим Микола Олександрович – доктор економічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: m.kyzym@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-2656>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1859367>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216130870>

Хаустова Вікторія Євгенівна – доктор економічних наук, професор, директор Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: v.khaust@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-9287>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/629132>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216123094>

Котляров Євген Іванович – кандидат економічних наук, доцент, завідувач сектора енергетичної безпеки та енергозбереження відділу промислової політики та енергетичної безпеки Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: ekotlarov@i.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-6729>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/V-3947-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701345149>

UDC 669+662.73+338.28

JEL: L60; L70

Shulha I. V., Kyzym M. O., Khaustova V. Ye., Kotliarov Ye. I. The Methodical Approach to Substantiation of the Method of Coal Gasification for the Production of Synthetic Motor Fuels

The aim of the article is to substantiate the most suitable method of gasification of Ukrainian hard coal for further production of synthetic motor fuel. For this substantiation, a methodical approach has been developed, the use of which has allowed to obtain the following results. As a raw material base, the article recommends long-flame coal of the Western Donbass, located on the territory of the Dnepropetrovsk region, where powerful enterprises for the extraction and enrichment of coal operate. The most common methods of coal gasification in the world are analyzed: Lurgi (counter-current steam-oxygen gasification of

large-lump coal (or briquettes) in a stationary bed), Siemens (direct-flow steam-oxygen gasification in the pulverized coal stream), Texaco (direct-flow oxygen gasification in the flow of coal-water pulp). For each of these methods, material balances have been developed; the composition and quality of the generated gas, the possibilities of organizing the production of the necessary energy resources, the level of emissions of harmful substances into the atmosphere and wastewater discharge have been evaluated. A methodology for calculating the composition of generator gas is proposed, which takes into account the composition of the blast (content of oxygen, water vapor or water). All calculations were performed for an enterprise with a coal capacity of 550 thousand tons of working weight per year. Based on the calculations and comparison of their results, the Texaco method is recommended for industrial implementation. The advantages of this method are as follows: the absence of a stage of steam production for gasification, the scarcity of the water cycle, which practically excludes the formation of wastewater, and the possibility of using contaminated water from other sources for gasification; the highest total content of hydrogen and carbon monoxide in the resulting synthesis gas; the maximum assimilated capacity of production reactors and the largest number of capacities created in the world using this technology; utilization of the heat of the resulting gas to obtain a large amount of electric and thermal energy.

Keywords: synthetic motor fuel, hard coal, gasification method, technical parameters of gasification, generator gas, energy needs, material and energy balances, energy resources.

Fig.: 2. **Tabl.:** 5. **Formulae:** 6. **Bibl.:** 10.

Shulha Ihor V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Head of the Coke Department, Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN) (7 Vesnina Str., Kharkiv, 61023, Ukraine)

E-mail: ko@ukhin.org.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9389-2690>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004957016>

Kyzym Mykola O. – D. Sc. (Economics), Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Chief Research Scientist, Research Centre for Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: m.kyzym@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-2656>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1859367>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216130870>

Khaustova Viktoriia Ye. – D. Sc. (Economics), Professor, Director of the Research Centre for Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: v.khaust@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-9287>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/629132>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216123094>

Kotliarov Yevhen I. – PhD (Economics), Associate Professor, Head of the Sector of Energy Security and Energy Efficiency of Department of Industrial Policy and Energy Security of the Research Centre for Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: ekotliarov@i.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-6729>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/V-3947-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701345149>

Україна не має ні власних значних покладів нафти, ні потужностей з переробки імпоротної сировини. Через це країна практично повністю залежить від імпорتنих постачань продуктів її переробки [1]. Тому актуальним є завдання заміни традиційних продуктів нафтопереробки на продукти, що виробляються з вітчизняної сировини.

Такою сировиною може бути викопне вугілля, загальні дійсні балансові запаси якого в Україні за категоріями А + В + С₁ складають майже 45 млрд т, які розсереджені по території країни по окремих вугільних басейнах: на частку Донецького припадає більш ніж 93% запасів, Львівсько-Волинського – ≈4,5% та Дніпровського буровугільного – ≈2% [2].

Стаття підготовлена за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках реалізації проєкту «Створення виробництва синтетичного рідкого палива з вугілля в Україні у воєнний та повоєнний періоди» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0061), що відібраний для виконання за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

У наявних запасах вугілля переважає мало-метаморфзоване вугілля – буре, довгополум'яне та газове – його частка перевищує дві третини. При цьому дві останні марки, що належать до кам'яного вугілля, видобуваються у промислових масштабах і вигідно відрізняються від бурого вугілля кращими технологічними властивостями – меншим вмістом вологи, кращою кускуватістю, збагачуваністю, більшим вмістом водню, який потрібний для отримання з нього синтетичних вуглеводнів.

Технології переробки саме такого вугілля на синтетичне моторне паливо відомі та мають промислове значення в деяких країнах [1]. Для практичного використання відомих у світі технологій, передусім необхідно обрати саме ту, яка найбільш придатна в умовах України.

Метою статті є обґрунтування найбільш придатного способу газифікації українського кам'яного вугілля для подальшого отримання синтетичного моторного палива.

Таке обґрунтування пропонується виконати на підставі розробленого авторами методичного підходу, сутність якого наведено на *рис. 1*.

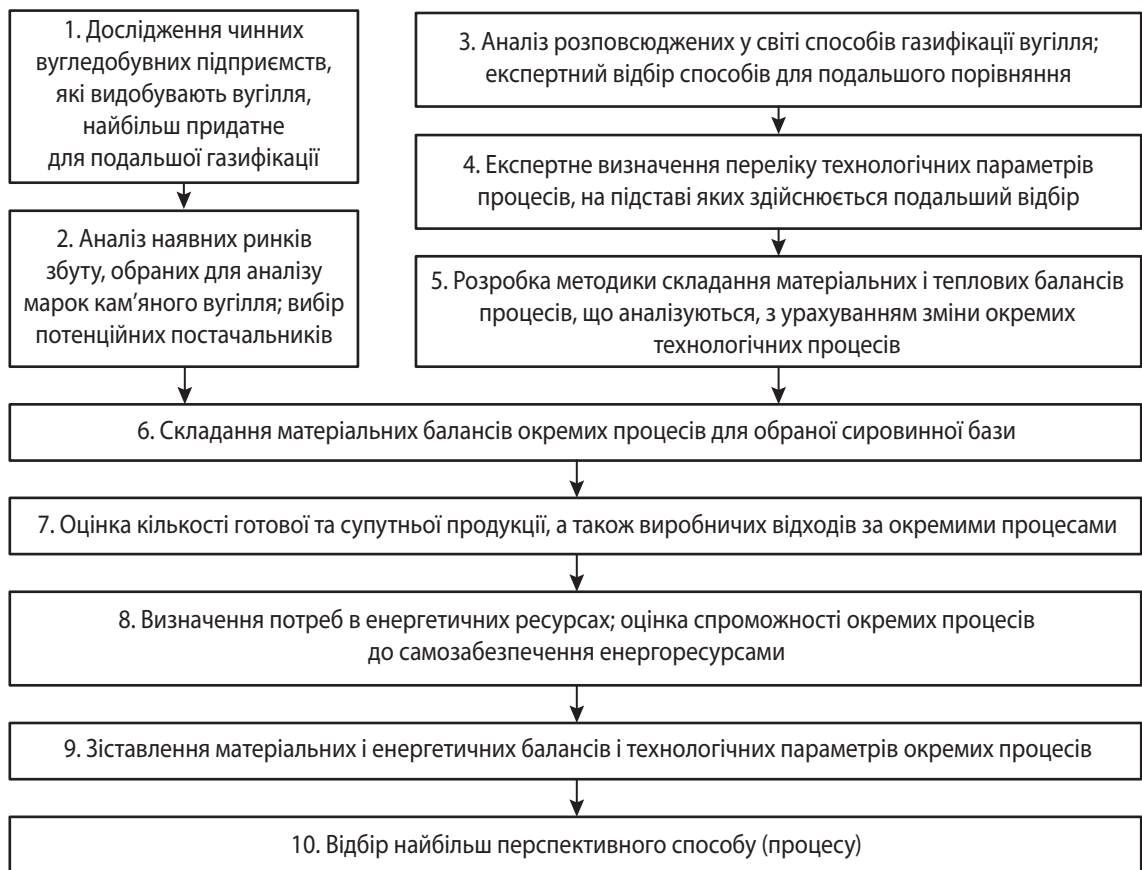


Рис. 1. Методичний підхід до вибору способу газифікації українського вугілля для подальшого виробництва синтетичного моторного палива

Джерело: авторська розробка.

Запропонований методичний підхід спирається на наявну сировинну базу та зіставлення різних способів газифікації вугілля:

- ✦ за технологічними параметрами окремих способів;
- ✦ за складом генераторного газу, що отримується окремими способами;
- ✦ за матеріальними й енергетичними балансами різних способів.

При розробці методичного підходу використані оприлюднені результати окремих досліджень, виконаних у ДП «УХІН» і ДП «Гіпрококс», а також дослідження, виконані авторами раніше.

В основу подальших висновків покладено вивчення властивості малометаморфованого вугілля, що видобувається низкою найбільших шахт Західного Донбасу. Дослідження представницьких проб, виконане в ДП «УХІН» [3], дозволило визначити таку зіставну характеристику технологічних властивостей вугілля цих підприємств (табл. 1).

За комплексом технологічних властивостей як сировинна база газифікації рекомендується енергетичне вугілля шахт 3 та 4, яке не використовується для коксування. Це вугілля має високий ви-

хід летких (тобто низькомолекулярних) речовин – продуктів термічної деструкції. До переваг вугілля цих шахт, з точки зору подальшої газифікації, слід віднести найменший вміст вуглецю і досить високий, як для кам'яного вугілля, вміст водню, а також достатньо високу теплоту спалювання. Усе це сприяє збільшенню виходу газу за їх газифікації, підвищенню його теплоти спалювання та зростанню ККД газифікації.

Традиційно це вугілля використовувалося для енергетичних потреб (спалювання на теплових електростанціях з виробництвом електроенергії). Зараз можливості такого його використання є обмеженими через втрату Україною значної частини вугільної генерації. Таким чином, переорієнтація використання цього вугілля для цілей газифікації має велике соціальне значення, оскільки воно дозволить зберегти вугледобувну промисловість Західного Донбасу і велику кількість робочих місць.

Наступним етапом запропонованого методичного підходу є дослідження різних способів газифікації вугілля. Раніше [1; 4] було показано, що найбільш підготовленими до промис-

Технологічні властивості вугілля [3]

Показник	Символ і одиниця виміру	Підприємство			
		1	2	3	4
Обсяг видобутку	тис. т	1714	1237	1520	2398
Зольність рядового вугілля	$A^d_{e,t}$ %	37,5	35,0	39,9	41,6
Вологість робоча	$W^r_{t,t}$ %	6,5	8,5	11,0	10,4
Вихід летких речовин	V^d	35,6	33,6	36,3	37,2
Сірчистість загальна сухої маси	S^d_t	2,3	2,5	1,5	1,1
Елементний склад:	%				
Вуглець	C^d	71,9	71,7	70,9	69,0
Водень	H^d	3,5	5,4	5,3	5,1
Азот	N^d	1,3	1,3	1,3	1,2
Сірка	S^d_t	2,3	2,5	1,5	1,1
Кисень	O^d_d	6,0	4,1	6,0	8,6
Зольність збагаченого вугілля	A^d	15,0	15,0	15,0	15,0
Теплота спалювання, нижча Q _{гi}	МДж/кг	26,8	26,1	24,6	25,7
Температура плавлення золи	оС	1490	1420	1420	1450
Товщина пластичного шару	У, мм	13	8	6	6

лового впровадження в Україні є такі способи газифікації провідних світових розробників:

- ✦ у нерухомому (стаціонарному) шарі німецької фірми Lurgi;
- ✦ у потоці вугледуттевої суміші німецької фірми Siemens;
- ✦ протиточна киснева газифікація водовугільної пульпи за технологією Техасо (США).

Порівняння цих способів газифікації здійснюється шляхом зіставлення таких технологічних параметрів (табл. 2).

Для подальшого порівняння використано дані різних джерел науково-технічної інформації щодо світової практики роботи різних промислових установок з газифікації вугілля, систематизовані в роботах [5; 6]. Розрахунки проводилися на підставі методики, викладеної в роботі [7].

Першим етапом зіставлення різних способів газифікації є порівняння складу синтез-газу (генераторного газу), що отримується при їх використанні.

Прогноз складу генераторного газу є багатоітераційним процесом, блок-схему якого наведено на рис. 2.

Стосовно окремих блоків схеми прогнозування слід відмітити таке.

Блок 1 – елементний склад вугілля, що спрямовується на газифікацію, в даному дослідженні приймається за даними табл. 1.

Блок 2 – кількість і склад дуття (кількість кисню та водню, що надходить до реактора) на початковому етапі розрахунків приймається за даними [5; 6].

Таблиця 2

Технологічні параметри, обрані для зіставлення різних способів газифікації

Параметр	Характеристика
Кількість і склад дуття	Витрати пари/води та кисню на тонну робочої маси вугілля
Параметри стану реакційної зони	Температура, °С; тиск, кПа
Розміри та кількість реакторів	Геометричні розміри окремого реактора (робочі діаметр і висота); кількість робочих і резервних реакторів
Кількість і властивості отриманого газу	Вихід газу з 1 т робочої маси вугілля; вміст у ньому домішок, які підлягають видаленню; склад газу після очищення; його густина та теплота спалювання

Джерело: авторська розробка.

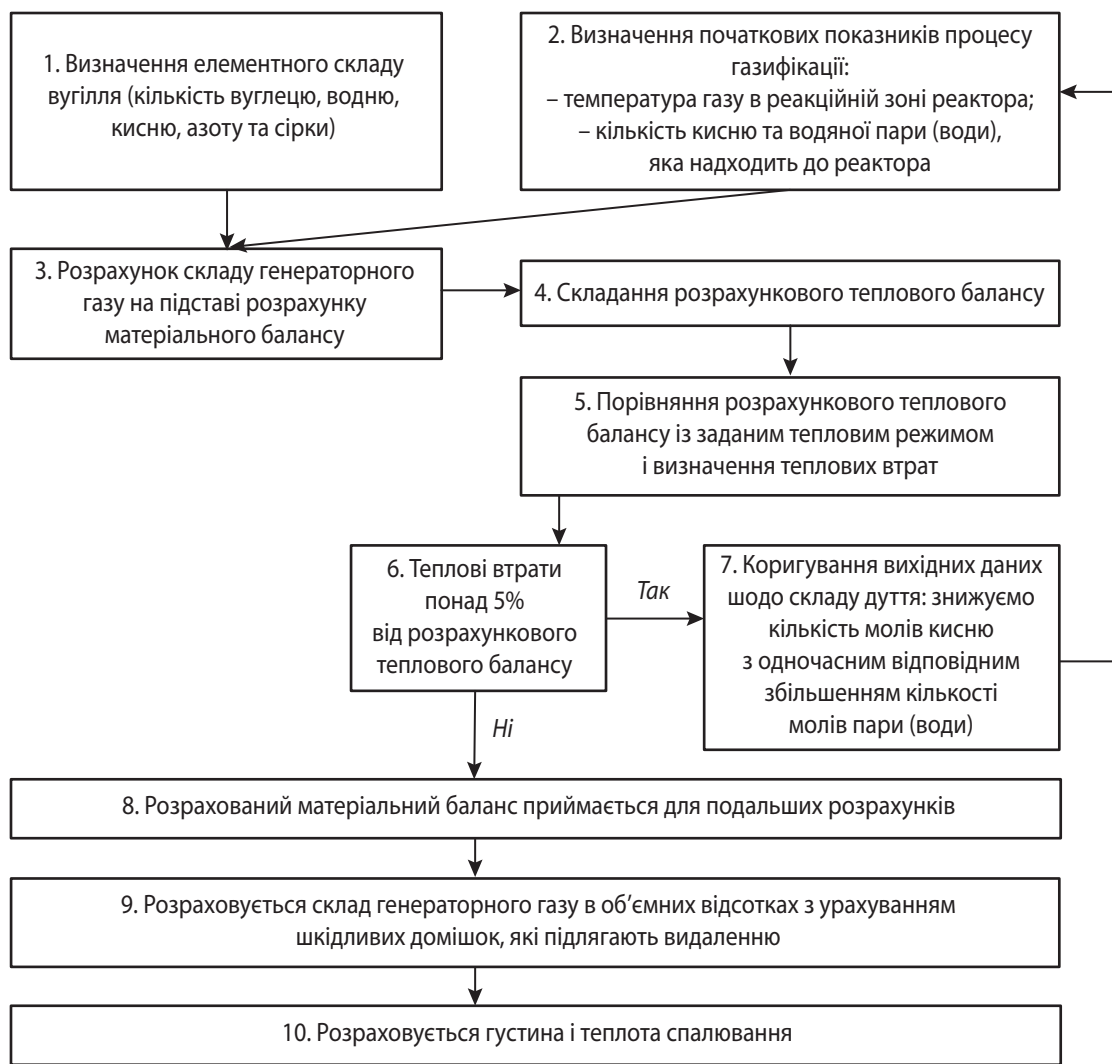


Рис. 2. Схема прогнозування складу генераторного газу залежно від елементного складу вугілля і технічних параметрів дуття

Джерело: авторська розробка.

Блок 3 – у процесі газифікації вугілля отримується декілька газоподібних продуктів, а саме: монооксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO₂), водень (H₂) та водяна пара (H₂O).

За складання матеріального балансу кількість молей основних компонентів генераторного газу – CO, CO₂, H₂, H₂O (водяна пара, яка не прореагувала) визначається із системи чотирьох рівнянь з чотирма невідомими:

$$CO + CO_2 = C_{\text{вих}}; \quad (1)$$

$$H_2 + H_2O = H_{2O_{\text{вих}}} + H_{2O_A} + H_{2\text{вих}}; \quad (2)$$

$$2CO_2 + CO = O_{2\text{вих}} + O_{2A}; \quad (3)$$

$$K = \frac{KCO}{KCO_2 \cdot KH_2}, \quad (4)$$

де C_{вих} – кількість молів вуглецю у вугіллі, що надходить в зону газифікації;

H₂O_{вих} – кількість молів води, що надходить з вихідним вугіллям;

H₂O_A – кількість молів водяної пари, що надходить з дуттям (або води, використаної для приготування пульпи);

H_{2вих} – кількість молів водню, що надходить з вихідним вугіллям;

O_{2вих} – кількість молів кисню, що надходить з вихідним вугіллям;

O_{2A} – кількість молів кисню, що надходить з дуттям.

Перші три рівняння є рівняннями балансів відповідно вуглецю, водню та кисню.

Як четверте рівняння для технологій газифікації в потоці (Siemens та Техасо) використовується співвідношення концентрацій (кількості молів) різних речовин в отримуваному газі за практичними даними [6; 7].

Для більш повільного процесу газифікації в стаціонарному шарі (технологія Lurgi) для четвертого рівняння приймається вираз для константи рівноваги оборотної реакції ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$). З урахуванням цього четверте рівняння приймає вигляд:

$$K_p = \frac{K_{\text{CO}} \cdot K_{\text{H}_2\text{O}}}{K_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{H}_2}}, \quad (4')$$

Величина K_p визначається згідно із залежністю її логарифма від абсолютної температури (в K) у реакційній зоні T [7]:

$$\lg K_p = 7,62 = 1,6 \lg T - \frac{2559}{T} - \frac{21261}{T^2}. \quad (5)$$

Отримане рішення системи з чотирьох рівнянь перевіряється шляхом складання теплового балансу (за вищою межею) отримання генераторного газу розрахованого складу за умов раніше прийнятих температур газу в реакційній зоні та на виході з реактора. Припустимо величину теплових втрат приймали на рівні 5–10%. Така частка втрат свідчила про правильність прийнятих значень витрати пари (води) та кисню в складі дуття на газифікацію.

Блок 4 – тепловий баланс процесу газифікації розраховується виходячи з того, що тепло, виділене за спалювання частини вуглецю до CO_2 , витрачається на ендотермічні процеси взаємодії решти вуглецю з водяною парою з утворенням CO та H_2 . У подальшому отримані дані про частки вуглецю, що окислюється до CO_2 та реагує з водяною парою, перевіряються за величиною теплових втрат, яка для забезпечення стійкого режиму роботи має знаходитись в межах 5%.

Блоки 5, 6, 7 – у випадку, якщо величина теплових втрат виходить за межі 5%, склад дуття (витрати пари (води) та кисню) коригується: знижується кількість молів кисню, який подається в складі дуття, за відповідного збільшення кількостей молів води (пари). Після чого виконується уточнювальний розрахунок матеріального балансу відповідно до блоку 3.

Блок 8 – після досягнення необхідної точності розрахунків визначається склад неочищеного від шкідливих домішок генераторного газу.

Вихід генераторного газу в $\text{м}^3/\text{т}$ вугілля визначається за кількістю молів утворених продуктів газифікації.

Кількість домішок, які потрібно вилучити з газу, визначається таким чином:

- ✦ смола за газифікації в стаціонарному шарі (спосіб Lurgi) – кількість прогнозується на рівні 10% летких речовин вугілля;

- ✦ аміак – виходячи з припущення, що на його утворення витрачається 25% азоту, що міститься у вугіллі, а решта переходить в газ у вигляді простої речовини N_2 ;
- ✦ сірководень – виходячи з припущення, що на його утворення витрачається 80% сірки вугілля.

Припущення щодо вмісту аміаку та сірководню зроблені виходячи з термохімічної переробки вугілля на коксохімічних підприємствах.

Блоки 9, 10 – склад генераторного газу визначається за кількістю молів утворених продуктів газифікації, а потім за визначеним складом розраховуються властивості газу – його густина й теплота спалювання.

Запропонована методика використана для подальших розрахунків, виконаних для вугілля шахти 4 (див. табл. 1).

Розрахунки виконані для переробки на рік 550 тис. т вугілля фактичної маси.

Розміри реакторів та їх продуктивність прийнято за наявними в джерелах науково-технічної інформації даними щодо промислово освоєних у світі технологічних процесів [6; 7], а необхідну кількість реакторів розраховано згідно із заданим обсягом переробки вугілля та розрахованою кількістю отриманого газу.

Технологічні параметри газифікації для різних способів газифікації наведено в табл. 3.

Аналіз наведених даних свідчить, що в способі Lurgi потрібна найбільша витрата пари. Це пов'язане передусім з недостатньою інтенсивністю процесу (малими швидкостями газифікації та великим часом перебування твердофазного матеріалу в реакторі – протягом 0,5–1,5 години), що вимагає застосування надлишку пари, ступінь розкладення якої не перевищує 50% за реакцією окислення вуглецю водяною парою (з отриманням водню та монооксиду вуглецю).

Для забезпечення здійснення такого ендотермічного процесу з поглинанням тепла потрібно спалювати в нижній частині реактора значну кількість вуглецю палива. Внаслідок цього газ характеризується максимальним вмістом CO_2 , який є баластом. Крім того, за знаходження вугілля протягом достатньо тривалого часу у верхній частині реактора (де практично відсутній кисень) розвиваються процеси термічної деструкції, внаслідок чого утворюються помітні кількості метану та смоли, що в даному випадку є побічними продуктами. Виникає необхідність додаткових стадій – очищення газу від смоли та конверсії метану, який є шкідливою домішкою в синтез-газі за синтезу Фішера – Тропша. Загалом сумарна кількість $\text{CO} + \text{H}_2$, отри-

Технологічні параметри газифікації

Параметр	Одиниця виміру	Lurgi	Siemens	Texaco
<i>Витрата компонентів дуття:</i>				
Пара	т/т вугілля	0,44	0,11	–
Кисень	м ³ /т вугілля	560	850	536
Вода на приготування пульпи	т/т вугілля	–	–	1,00
Максимальна температура	°С	950	1300	1600
Тиск	атм	25	7	40
Вихід очищеного газу	м ³ /т вугілля	1680	2120	1652
<i>Склад очищеного газу:</i>				
	% (об.)			
Монооксид вуглецю (CO)		42,7	48	55
Водень (H ₂)		30,6	27	31
Діоксид вуглецю (CO ₂)		20,7	10	12
Метан (CH ₄)		5,7	≤1	≤1
Азот + аргон (N ₂ + Ar)		0,3	14	≤1
<i>Вміст домішок у газі:</i>				
	г/м ³			
Сірководень (H ₂ S)		5,5	4,5	5,5
Аміак (NH ₃)		2	1,4	2
Смола		24	–	–
Теплотвірна здатність газу	ккал/м ³	2583	2248	2565
Густина газу	кг/м ³	1,011	0,831	0,958
<i>Розміри реактора:</i>				
	м			
Діаметр		4,7	2	7,6
Висота		11,0	20	40
Кількість робочих реакторів		2	3	1

Джерело: розраховано авторами.

муваних з 1 т вугілля, за використання способу Lurgi найменша (1230 м³/т). Крім цього, дана технологія вимагає використання грубого сортового вугілля (більше 6 мм), який найбільш дефіцитний через розвиток механізованих технологій видобутку, які надміру подрібнюють вугілля.

Спосіб Siemens характеризується раціональнішим складом дуття – більшою кількістю використаного кисню та меншою – водяної пари. Внаслідок цього вміст CO₂ в газі найменший серед усіх трьох процесів, а сумарний вихід CO та H₂ – максимальний (1590 м³/т вугілля).

За використання способу Texaco виключається використання пари в складі дуття. Замість цього газифікується водо-вугільна пульпа. Витрати тепла на випаровування води в реакторі знижують вихід газу та ККД реактора. Частина цього зниження компенсується застосуванням підвищених температур і тиску. Тому вміст CO₂ в газі порівняно з попереднім процесом зростає лише на 2% – від 10%

до 12%. Сумарний вміст у газі CO та H₂ максимальний, але загальний вихід цих компонентів на 1 т вугілля (1420 м³) менший, ніж за способом Siemens, через уже зазначене зниження виходу газу.

Теплота спалювання газу, отриманого за способом Siemens, менша, ніж за двома іншими, оскільки за газифікації пиловидного палива в потці отримуваний газ розбавляється азотом, що використовується для подачі подрібненого вугілля до реактора. Зміни густини газу зумовлені передусім вмістом у ньому найважчого компонента – CO₂.

Спосіб Texaco характеризується найбільшою продуктивністю промислово освоєних реакторів. Переробка 550 тис. т вугілля на рік забезпечується одним робочим реактором продуктивністю за сировиною 75 т/год. За технологією Lurgi потрібно два робочі реактори продуктивністю по 50 т/год кожний.

За способом Siemens достатній обсяг інформації є лише за реакторами продуктивністю 25 т/год,

які експлуатувались протягом 25 років на комбінаті Schwarze Pumpe (Східна Німеччина). Аналогічний реактор введений в експлуатацію 2008 р. на підприємстві в Suaz Vresova (Чехія). Таких робочих реакторів для забезпечення заданої річної продуктивності за вугіллям потрібно три. Інформації про реактори продуктивністю 60 т/год, передбачені для двох підприємств у Китаї, на даному етапі недостатньо для прийняття обґрунтованого рішення про застосування таких реакторів [8].

На підставі технологічних параметрів газифікації та аналізу джерел науково-технічної інформації була визначена потреба в енергоресурсах за використання різних технологій: питома (на тонну вугілля, що переробляється), годинна (62,8 т/год за вугіллям) і на весь річний випуск продукції. Цю потребу наведено в *табл. 4*.

Витрати пари та кисню зумовлені технологічними параметрами газифікації. Мінімальна витрата електроенергії характерна для способу Lurgi, який менш інтенсивний та потребує менших витрат на вуглепідготовку (не потрібне подрібнення вугілля). Найбільша витрата електроенергії – за способом Siemens, де потрібна максимальна кількість кисню.

У способі Техасо хімічно очищена вода необхідна для живлення котлів-утилізаторів, у двох інших технологіях – для отримання пари для газифікації. Технічна оборотна вода необхідна в усіх технологіях для охолодження газу перед очищенням. Забруднена оборотна вода в способі Lurgi необхідна для зрошення колектора газу, що виходить з реакторів за температури 480 °С, а в способі Техасо – для зрошення скрубєрів, в яких охолоджується газ, що виходить з котлів-утилізаторів другого ступеня з температурою 300 °С. Безповоротна витрата забрудненої води необхідна в способі Техасо для приготування водо-вугільної пульпи, а в способі Siemens – для загартовування газу (охолодження його до 70 °С) у нижній частині реактора.

Обсяги отримуваної супутньої продукції, кількість відходів виробництва та стічних вод зумовлені властивостями вихідної сировини та технологічними параметрами газифікації. Дані про ці обсяги наведено в *табл. 5*.

Спосіб Техасо – єдиний серед розглянутих, що дозволяє утилізувати тепло отриманого газу для отримання пари й електроенергії. Це дозволяє забезпечити своєю електроенергією принаймні значну частину потреб основного виробництва. Цей спосіб не використовує пару, тому отримувана пара може бути товарною продукцією.

У протиточному способі Lurgi частина тепла отриманого газу використовується для підігріву

вихідного вугілля у верхніх шарах реактора. У способі Siemens все тепло отриманого газу безповоротно втрачається за його загартовування (охолодження циркулюючою водою) в нижній частині реактора. Необхідно зазначити, що прототипом цієї технології є технологія Гірничого бюро США, яка використовувалась в промисловості в 50-х рр. минулого століття [5]. Водночас сучасні технології газифікації вугілля в потоці (наприклад, варіант PSG способу PRENFLO [9]) передбачають використання тепла отриманого газу в котлах-утилізаторах.

У способі Lurgi утворюються помітні кількості смоли внаслідок реакцій термічної деструкції без доступу повітря за достатньо тривалого знаходження вугілля у верхній частині реакторів. Як і в інших безперервних процесах переробки вугілля (наприклад, у виробництві формованого коксу), ця смола забруднена виносом твердофазного матеріалу, тому, незважаючи на свій малий ступінь піролізованості, характеризується підвищеними в'язкістю, густиною та вмістом нерозчинних речовин.

Кількість отримуваних сірчаної кислоти та сульфату амонію визначається ресурсами сірки та азоту у вихідному вугіллі. Приблизно 30% отримваної сірчаної кислоти використовуватиметься за вловлювання аміаку, а решта (70%) буде товарною продукцією.

Кількість утворюваного шлаку визначається передусім зольністю вугілля. Для отримання шлаку в товарному вигляді за переробки тонкоподрібненого вугілля треба передбачити температуру газифікації вище температури плавлення золи, а також подальшу грануляцію шлаку.

Частину сировини з реакторів, що уноситься з утворюваним газом, передбачається виділяти за очищення газу та повертати на газифікацію.

Кількість отримуваних стічних вод визначається за балансом водню (різниця прибутку та витрати) в технологічному процесі. При цьому головними прибутковими статтями є: водень органічної маси вугілля, вологість вугілля, кількість пари (води), що надходить на газифікацію. Витратними статтями є: водень в газі у вигляді простої речовини (H₂), у складі метану (CH₄) та у складі насичуваної газ водяної пари за температури після охолодження газу перед його очищенням.

Найбільша кількість стічних вод утворюється в способі Lurgi через його малу інтенсивність та зумовлений цим низький ступінь розкладання пари (≈44%). Стічні води утворюються також і в способі Siemens, хоча і в меншій кількості.

Спосіб Техасо є дефіцитним за водою, оскільки частина води, що входить до складу пульпи, за

Таблиця 4

Потреба в енергоресурсах різних способів газифікації 550 тис. т кам'яного вугілля на рік

Ресурс, одиниця виміру	Спосіб Lurgi			Спосіб Siemens			Спосіб Техасо		
	т	на годину	на рік	т	на годину	на рік	т	на годину	на рік
Пара, т	0,44	27,6	242000	0,11	6,9	60500	-	-	-
Кисень, тис м ³	0,56	35,2	308072	0,85	53,4	467609	0,54	33,7	294869
Електроенергія, кВт · год	42	2638	23105376	172	10802	94622016	125	7850	68766000
Вода, м ³ :									
Хімічно очищена оборотна	0,44	27,6	242000	0,11	6,9	60500	0,33	20,7	181542
Технічна оборотна	1,26	79,1	693161	0,95	59,7	522622	0,33	20,7	181542
Забруднена оборотна	12	754	6601536	-	-	-	6,7	421	3685858
Забруднена	-	-	-	1,5	94,2	825192	1	62,8	550000

Примітка: забруднена оборотна вода циркулює в циклі (охолодження газу в колекторах Lurgi як аналог нашого газозбірника, в Техасо – для до охолодження газу після котлів-утилізаторів), просто забруднена вода витрачається безповоротно – в Siemens – на загарування газу, в Техасо – на приготування пульпи.

Джерело: розраховано авторами.

Таблиця 5

Обсяги отримуваної супутньої продукції, кількість відходів виробництва та стічних вод за різних способів газифікації 550 тис. т кам'яного вугілля на рік

Найменування, одиниця виміру	Спосіб Lurgi			Спосіб Siemens			Спосіб Техасо		
	т	на годину	на рік	т	на годину	на рік	т	на годину	на рік
<i>Супутня продукція</i>									
Електроенергія, кВт · год	-	-	-	-	-	-	53,3	3348	29326054
Пара, т	-	-	-	-	-	-	0,33	20,7	181332
Смола, т	0,04	2,5	22000	-	-	-	-	-	-
Сірчана кислота, т	0,026	1,6	14080	0,026	1,6	14080	0,026	1,6	14080
Сульфат амонію, т	0,01	0,65	5700	0,01	0,65	5700	0,01	0,65	5700
<i>Відходи</i>									
Шлак т	0,14	8,74	76580	0,14	8,74	76580	0,14	8,74	76580
Стічна вода, м ³	0,25	15,5	135780	0,08	5,0	43780	-	-	-

Джерело: розраховано авторами.

газифікації розкладається. Тому для приготування пульпи потрібне безперервне підведення додаткової кількості води. При цьому можливе використання води з органічними забрудниками (наприклад, господарсько-фекальної або утвореної за очищення газу). Зокрема, за створення потужностей з газифікації вугілля на коксохімічному підприємстві з цією метою планували використовувати надлишкову воду після аміачних колон виробництва коксу [10].

Порівняння розглянутих способів газифікації дозволяє рекомендувати до впровадження в Україні спосіб Техасо. Крім переваг цього способу, що були відмічені вище, вибір цього способу пояснюється також таким.

По-перше. Безперервність виробничих процесів газифікації вугілля висуває підвищені вимоги до електрозабезпечення, що в сучасних умовах складно гарантувати. Цей спосіб є єдиним із розглянутих, який дозволяє організувати, крім виробництва генераторного газу, ще й значну кількість електроенергії (завдяки використанню енергії великої кількості пари, що утворюється в процесі газифікації), достатньої (або майже достатньої) для задоволення власних потреб. В умовах дефіцитності електрогенерувальних потужностей в Україні ця перевага способу Техасо робить його більш конкурентоспроможним порівняно зі способами Lurgi та Siemens.

По-друге, велика інтенсивність процесу газифікації обумовлює більш велику продуктивність реактора газифікації. Для варіанта, що розглядається (переробка 550 тис. т кам'яного вугілля на рік) достатньо лише одного робочого реактора, порівняно з двома-трьома, які потрібні для інших способів. Це обумовлює більш компактне розміщення обладнання та меншу матеріалоемність виробництва генераторного газу.

З виконаного дослідження можна зробити такі узагальнювальні **висновки**.

1. Показано можливість та доцільність отримання синтез-газу та моторних палив на його основі з малометаморфованого кам'яного вугілля, запаси якого в Україні сягають 28 млрд т, що перевищує 60% від загальної кількості наявних запасів. Як сировинна база у статті розглядається довгополум'яне вугілля Західного Донбасу, розташоване на території Дніпропетровської області, де діють потужні підприємства з видобутку та збагачення вугілля.

2. Найбільш розповсюдженими у світі технологіями газифікації вугілля є: спосіб Lurgi (проточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) у стаціонарному шарі), спо-

сіб Siemens (прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля), спосіб Техасо (прямоточна киснева газифікація в потоці водо-вугільної пульпи).

3. На підставі проведених розрахунків для умов промислового підприємства потужністю за сировиною 550 тис. т вугілля на рік для промислового впровадження рекомендовано спосіб Техасо. Перевагами цього процесу є: відсутність стадії отримання пари для газифікації, дефіцитність водного циклу, що практично виключає утворення стічних вод і можливість використання для газифікації забрудненої води з інших джерел; найбільший сумарний вміст в отримуваному синтез-газу водню та оксиду вуглецю; максимальні освоєна потужність виробничих реакторів та найбільша кількість потужностей, які створюються у світі саме за цією технологією; утилізація тепла отриманого газу для одержання великої кількості електричної та теплової енергії.

4. Після створення та освоєння головної промислової установки з'явиться можливість тиражування технології в різних регіонах України для забезпечення господарських потреб у заміниках продуктів, отримуваних наразі переробкою імпортованих нафти та природного газу. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Техніко-економічні засади створення підгалузі з виробництва рідкого синтетичного палива в Україні / М. О. Кизим, В. Є. Хаустова, В. В. Шпілевський та ін. Харків : ФОРМ Лібуркіна Л.М., 2022. 212 с.
2. Шульга І. В., Котляров Є. І., Кизим М. О., Хаустова В. Є. Перспективна сировинна база процесів виробництва синтетичного рідкого палива з українського вугілля. *Вуглехімічний журнал*. 2023. № 5. С. 3–11.
DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-3-11>
3. Шульга І. В., Мирошниченко Д. В., Рудыка В. І., Цымбал А. А. Химико-технологическая переработка углей различных регионов Украины. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2019. № 3. С. 8–16.
DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.01>
4. Шульга І. В., Кизим М. О., Котляров Є. І. Напрямок удосконалення технологій конверсії вугілля в синтетичні рідкі палива. *Вуглехімічний журнал*. 2023. № 6. С. 37–44.
DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-6-37-44>
5. Тютюнников Ю. Б., Шептовицкий М. С., Шульга І. В. Газификация твердых топлив. Харьков : ХГЭУ, 1994. 64 с.
6. Шульга І. В. Газификация твердых топлив // Справочник коксохимика. Т. 2. Гл. 20.2. Харьков : ИД «ИНЖЭК», 2014. С. 697–715.

7. Тютюнников Ю. Б., Шептовицкий М. С., Шульга И. В. Технологические схемы, расчет и моделирование промышленных установок газификации угля. Харьков : ХГЭУ, 1996. 80 с.
8. Рудика В. І. Перспективи виробництва синтетичного моторного палива в Україні : монографія. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2017. 152 с.
9. Schellberg W., Ullrich N., Bakker W. T., Leferink R. G. I. The PRENFLO gasification process, design and materials experience. *Materials at High Temperatures*. 1997. Vol. 14. Iss. 2. P. 159–163.
DOI: <https://doi.org/10.1080/09603409.1997.11689540>
10. Шульга И. В. Развитие химико-технологических процессов переработки угля. *Угলেখимический журнал*. 2015. № 3–4. С. 21–31.

REFERENCES

- Kyzym, M. O. et al. *Tekhniko-ekonomichni zasady stvorennya pidhaluzi z vyrobnytstva rідkoho syntetychnoho palyva v Ukraini* [Technical and Economic Principles of the Creation of a Sub-industry for the Production of Liquid Synthetic Fuel in Ukraine]. Kharkiv: FOP Liburkina L.M., 2022.
- Rudyka, V. I. *Perspektyvy vyrobnytstva syntetychnoho motornoho palyva v Ukraini* [Prospects for the Production of Synthetic Motor Fuel in Ukraine]. Kharkiv: FOP Liburkina L. M., 2017.
- Schellberg, W. et al. "The PRENFLO gasification process, design and materials experience". *Materials at High Temperatures*, vol. 14, no. 2 (1997): 159-163.
DOI: <https://doi.org/10.1080/09603409.1997.11689540>
- Shulga, I. V. "Gazifikatsiya tverdykh topliv" [Gasification of Solid Fuels]. In *Spravochnik koksohimika*, vol. 2. 697-715. Kharkov: ID «INZhEK», 2014.

- Shulga, I. V. "Razvitiye khimiko-tekhnologicheskikh protsessov pererabotki uglya" [Development of Chemical-technological Processes for Coal Processing]. *Uglekhimicheskii zhurnal*, no. 3-4 (2015): 21-31.
- Shulga, I. V. et al. "Khimiko-tekhnologicheskaya pererabotka ugley razlichnykh regionov Ukrainy" [Chemical-Technological Processing of Coals of Various Regions of Ukraine]. *Energotekhnologii i resursosberezheniye*, no. 3 (2019): 8-16.
DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.01>
- Shulha, I. V. et al. "Perspektyvna syrovynna baza protsesiv vyrobnytstva syntetychnoho rідkoho palyva z ukrainskoho vuhillia" [A Promising Raw Material Base for the Production of Synthetic Liquid Fuels from Ukrainian Coal]. *Vuhlekhimichnyi zhurnal*, no. 5 (2023): 3-11.
DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-3-11>
- Shulha, I. V., Kyzym, M. O., and Kotliarov, Ye. I. "Napriamky udoskonalennia tekhnologii konversii vuhillia v syntetychni rідki palyva" [Directions for Improving Technologies for Converting Coal into Synthetic Liquid Fuels]. *Vuhlekhimichnyi zhurnal*, no. 6 (2023): 37-44.
DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-6-37-44>
- Tyutyunnikov, Yu. B., Sheptovitskiy, M. S., and Shulga, I. V. *Gazifikatsiya tverdykh topliv* [Gasification of Solid Fuels]. Kharkiv: KhGEU, 1994.
- Tyutyunnikov, Yu. B., Sheptovitskiy, M. S., and Shulga, I. V. *Tekhnologicheskiye skhemy, raschet i modelirovaniye promyshlennykh ustanovok gazifikatsii uglya* [Technological Schemes, Calculation and Modeling of Industrial Coal Gasification Plants]. Kharkiv: KhGEU, 1996.