

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РІЗНИХ СПОСОБІВ ГАЗИФІКАЦІЇ БУРОГО ВУГІЛЛЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СИНТЕТИЧНОГО МОТОРНОГО ПАЛИВА

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

УДК 338.28
JEL: L60; L70

Котляров Є. І., Шульга І. В., Кизим М. О., Хаустова В. Є. Техніко-економічна оцінка різних способів газифікації бурого вугілля для виробництва синтетичного моторного палива

Метою статті є оцінка доцільності організації виробництва синтез-газу з бурого вугілля, запаси якого в Україні є достатніми. Як сировинна база в статті розглядається вугілля Ново-Дмитрівського родовища, що розташоване на території Харківської області. Балансові запаси бурого вугілля в ньому за категоріями А + В складають 284,4 млн т і за категорію C_1 – 95,6 млн т, тобто разом 380 млн т. Середні за родовищем дані технічного аналізу такі: волога на робочу масу – 51,2 %; зольність на суху масу – 19,4%; вміст загальної сірки – 2,45%. Елементний склад вугілля цього родовища характеризується такими даними: вуглець – 68,0%, водень – 6,0%, кисень – 23,0%, сірка, азот та інші елементи – 3,0%. Для досягнення мети досліджено властивості вугілля цього родовища та проаналізовано розповсюджені у світі такі технології газифікації вугілля: процес Lurgi (протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) у стаціонарному шарі); процес Prepflo (прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля); процес Техасо (прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи). Для кожного з цих процесів розроблено матеріальні баланси, оцінено якість синтез газу, можливості організації виробництва необхідних енергоресурсів, рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу, основні техніко-економічні показники. Розрахунки виконано для підприємства з потужністю по вугіллю 9 млн т фактичної маси на рік. На підставі проведених розрахунків для промислового впровадження рекомендовано процес Lurgi. Перевагами цього процесу є: найнижча температура і тиск процесу газифікації; ширший асортимент продукції, що отримується при газифікації; майже оптимальний склад синтез-газу за співвідношенням H_2 : CO; найменші викиди діоксиду вуглецю, що утворюється при газифікації вугілля та підготовки синтез-газу для подальшого використання; найнижча виробнича собівартість підготовленого синтез-газу; найменші питомі капіталовкладення (в розрахунку на 1 тис. м³ підготовленого синтез-газу). Обґрунтовано недоцільність застосування для газифікації бурого вугілля процесу Техасо, а також визначено напрями вдосконалення процесу Prepflo для його подальшого застосування при газифікації бурого вугілля Ново-Дмитрівського родовища.

Ключові слова: синтетичне моторне паливо, техніко-економічна оцінка, виробництво синтез-газу, буре вугілля, процеси газифікації, показники газифікації, матеріальний баланс, виробнича собівартість, сировинна база, викиди діоксиду вуглецю.

Табл.: 9. Формул: 1. Бібл.: 10.

Котляров Євген Іванович – кандидат економічних наук, доцент, завідувач сектора енергетичної безпеки та енергозбереження відділу промислової політики та енергетичної безпеки, Науково-дослідний центр 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>

Шульга Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, завідувач коксового відділу, ДП «Український державний науково-дослідний вузлехімічний інститут (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-дослідний центр 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>

UDC 338.28

JEL: L60; L70

Kotliarov Ye. I., Shulha I. V., Kyzym M. O., Khaustova V. Ye. A Feasibility Study of Different Methods of Gasification of Brown Coal for the Production of Synthetic Motor Fuel

The aim of the article is to assess the feasibility of organizing the production of synthesis gas from brown coal, the reserves of which in Ukraine are sufficient. As a raw material base, the article considers the coal of the Novo-Dmytrivske deposit, which is located on the territory of the Kharkiv region. The balance reserves of brown coal in categories A + B amount to 284.4 million tons and in category C_1 – to 95.6 million tons, that is, a total of 380 million tons. The average techni-

cal analysis data for the deposit are as follows: moisture per working weight is 51.2%; ash content per dry weight is 19.4%; the total sulfur content is 2.45%. The elemental composition of the coal of this deposit is characterized by the following data: carbon – 68.0%, hydrogen – 6.0%, oxygen – 23.0%, sulfur, nitrogen and other elements – 3.0%. To achieve the goal, the properties of coal of this deposit have been examined and the following technologies of coal gasification have been analyzed: Lurgi process (counter-current steam-oxygen gasification of coarse coal (or briquettes) in a stationary bed); Prenflo process (direct-flow steam-oxygen gasification in a pulverized coal stream); Texaco process (direct-flow oxygen gasification in a coal-water pulp stream). For each of these processes, material balances have been developed; the quality of gas synthesis, the possibility of organizing the production of the necessary energy resources, the level of emissions of harmful substances into the atmosphere, and the main technical and economic indicators have been evaluated. The calculations were made for an enterprise with a coal capacity of 9 million tons of actual weight per year. Based on the calculations made, the Lurgi process is recommended for industrial implementation. The advantages of this process are: the lowest temperature and pressure of the gasification process; a wider range of products obtained during gasification; almost optimal syngas composition in terms of $H_2 : CO$ ratio; the lowest emissions of carbon dioxide generated during coal gasification and preparation of synthesis gas for further use; the lowest production cost of prepared synthesis gas; the lowest specific capital investments (per 1 thousand m^3 of prepared synthesis gas). The inexpediency of using the Texaco process for the gasification of brown coal is substantiated, as well as the directions for improving the Prenflo process for its further use in the gasification of brown coal of the Novo-Dmytrivske deposit are determined.

Keywords: synthetic motor fuel, feasibility study, synthesis gas production, brown coal, gasification processes, gasification indicators, material balance, production cost, raw material base, carbon dioxide emissions.

Tabl.: 9. **Formulae:** 1. **Bibl.:** 10.

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

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>

Shulha Ihor V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Head of Coke Department, SE «Ukrainian State Research Coal and Chemical Institute (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>

Українська національна безпека та незалежність визначається, крім іншого, і можливостями забезпечення енергетичної незалежності, тобто наявністю потужностей з виробництва паливно-енергетичних ресурсів у обсягах, що визначаються внутрішнім споживанням. Однією зі складових енергетичної безпеки є забезпечення потреб економіки в моторному паливі.

Російська військова агресія призвела до втрати Україною потужностей з переробки нафти та газового конденсату, і на даний час уся потреба в

бензині, дизельному й авіаційному пальному, а також у скрапленому газі для двигунів внутрішнього згоряння покривається виключно шляхом імпорتنних поставок.

Виходом із ситуації, що склалася, є організація виробництва моторного палива ненафтового походження.

Раніше виконані нами дослідження [1; 2] довели перспективність і економічну доцільність організації виробництва синтетичних моторних палив (далі – СМП) із сировини ненафтового походження, а саме, з кам'яного вугілля, запаси якого є достатніми для задоволення потреб України в моторному паливі. Виробництво СМП із кам'яного вугілля передбачає газифікацію вугілля з отриманням синтез-газу та подальший синтез з нього суміші вуглеводнів (синтетичної нафти) за реакцією Фішера – Тропша. Сировиною для виробництва синтез-газу може бути не тільки кам'яне вугілля,

Статтю підготовлено 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 2022.01/0061), що виконується за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

а й інші вуглецевмісні речовини (природний газ, буре вугілля, побутові відходи тощо), які наявні в достатній кількості.

Метою даної статті є оцінка доцільності організації виробництва синтез-газу з бурого вугілля, запаси якого в Україні є достатніми для організації масового видобутку та переробки. Як сировинна база для виробництва синтез-газу в статті розглядається вугілля Ново-Дмитрівського родовища (Харківська область).

Для досягнення мети вирішувалися такі завдання:

- ✦ дослідження родовища та властивостей вугілля; визначення потужності підприємства з виробництва СМП;
- ✦ дослідження розповсюджених у світі технологій газифікації вугілля та особливостей їх апаратурного оформлення;
- ✦ зіставлення матеріальних балансів окремих технологій газифікації;
- ✦ зіставлення техніко-економічних показників окремих технологій газифікації (капіталоємність, енергоємність, чисельність персоналу, можливості щодо організації супутнього виробництва енергоресурсів);
- ✦ оцінка окремих процесів газифікації бурого вугілля за локальними критеріями доцільності;
- ✦ вибір процесу газифікації бурого вугілля Ново-Дмитрівського родовища.

Усі висновки та пропозиції базуються на результатах розрахунків, виконаних фахівцями Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України і Державного підприємства «Український науково-дослідний вуглехімічний інститут» (ДП УХІН) під час проведення наукових досліджень протягом минулих років.

Ново-Дмитрівське родовище бурого вугілля розташоване в північно-західній частині Донбасу в Харківській області та знаходиться безпосередньо на північному сході від м. Барвінкове. За детальної розвідки були виявлені балансові запаси 284,4 млн т сумарно за категоріями А + В і 95,6 млн т за категорією С₁, разом 380 млн т. Також є дані про запаси за категорією С₂ в кількості 35 млн т, але в подальших розрахунках ці запаси не враховувалися.

Особливості залягання вугілля на цьому родовищі сприятливі для організації відкритого видобутку кар'єрним способом.

Головне промислове значення мають два пласти: III₂ та IV₂, відповідно із запасами 75% та 19,6% від загальної кількості балансових запасів. Середня потужність пласта III₂ – 50 м, пласта IV₂ – 7,5 м.

Середні за пластами дані технічного аналізу такі: волога на робочу масу – 51,2%; зольність на суху масу – 19,4%; вміст загальної сірки в сухій масі – 2,45%.

Елементний склад органічної маси вугілля цього родовища характеризується такими даними: вуглець – 68,0%, водень – 6,0%, кисень – 23,0%, сірка, азот та інші елементи – 3,0%.

Виходячи з обсягу запасів за категоріями А + В подальші розрахунки виконано для виробничого комплексу потужністю 9 млн т вугілля на рік. Така потужність дозволяє відпрацювати родовище протягом 42–45 років.

Для виконання подальших зіставлень і оцінок як локальні критерії запропоновано такі (табл. 1).

Для вибору процесу газифікації бурого вугілля проаналізовано процеси газифікації вугілля, які мають найбільше промислове поширення у світі:

- ✦ протиточна парокиснева газифікація крупнокускового вугілля (або брикетів) у стаціонарному шарі (процес Lurgi [3]);
- ✦ прямоточна парокиснева газифікація в потоці пиловидного вугілля (процеси Koppers-Totzek, Siemens [4], Prenflo [5]); для подальших розрахунків і порівнянь обрано процес Prenflo;
- ✦ прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи (процеси Техасо, Conoco-Phillips [6]); для подальших розрахунків і порівнянь обрано процес Техасо.

Особливості цих груп процесів у випадку переробки бурого вугілля полягають у такому (табл. 2).

Процес Lurgi, вимагає для газифікації крупнокускового кам'яне вугілля, а у випадку газифікації бурого вугілля – його попереднє брикетування. Внаслідок того, що вугілля в середньому має робочу вологу 51,2%, для ефективного брикетування необхідним є його підсушування, принаймні до вологості 19%. Для сушіння вихідного вугілля передбачається використання парових сушарок, що передбачає організацію виробництва водяної пари.

Крім того, водяна пара необхідна безпосередньо для процесу газифікації (як джерело водню).

Передбачається, що необхідна для сушарок і процесу газифікації пара виробляється на підприємстві на власній котельні, яка працює на бурому вугіллі. Розрахунки показують, що з 9 000 тис. т вихідного вугілля 1 914 тис. т необхідно для отримання необхідної кількості пари. Відповідно, безпосередньо на газифікацію може бути витрачено 7 086 тис. т фактичної маси.

У котельні передбачається використання когенерації, що дозволить частково задовільнити потреби підприємства в електроенергії.

Локальні критерії оцінки доцільності різних процесів газифікації

Локальний критерій	Сутність
Ступінь використання вуглецю	Частка вуглецю вихідного вугілля, яка увійшла до складу синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів
Якість синтез-газу	Співвідношення між окремими компонентами
Енергонезалежність процесу	Рівень забезпеченості потреби в тепло- та електроенергії за рахунок власного виробництва
Екологічність процесу	Кількість викидів шкідливих речовин в атмосферу
Капіталоємність процесу	Відношення прогнозованої суми капіталовкладень до кількості очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів
Трудомісткість процесу	Відношення кількості очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, до штатної чисельності персоналу
Виробнича собівартість синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів	Вартість матеріальних, енергетичних, трудових ресурсів, амортизаційні відрахування, інші витрати, безпосередньо пов'язані з виробництвом і очищенням синтез-газу

Джерело: авторська розробка.

Особливості підготовки і газифікації вугілля за різними процесами

Характеристика окремих стадій виробництва	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Підготовка вугілля	Необхідність сушки вугілля та подальшого брикетування	Сушка вугілля та подрібнення до розміру менше 0,01 мм	Подрібнення до розміру 0,08 мм з подальшим приготуванням водовугільної пульпи
Подача сировини в реактор	Завантаження брикетів	У середовищі інертного газу (азоту чи діоксиду вуглецю)	Подача водовугільної пульпи
Основні матеріали, що додатково вводяться до реактора	Водяна пара; кисень	Водяна пара; кисень	Кисень
Режим газифікації	Температура: 1200 °C; тиск: 2–3 МПа	Температура: 2000 °C; тиск: 3 МПа	Температура: 1600 °C; тиск: 3,5–4,0 МПа
Тривалість процесу газифікації	1–3 год	0,5–10 с	1–10 с
Супутні продукти газифікації	Буровугільна смола; шлак газифікації	Шлак газифікації	Шлак газифікації
Супутні продукти очищення синтез-газу	Сульфат амонію; сірчана кислота	Сульфат амонію; сірчана кислота	Сульфат амонію; сірчана кислота

Джерело: складено з урахуванням даних, наведених у [1; 7].

За газифікації бурого вугілля за процесом Prenflo також необхідним є його попереднє підсушування; так само, як і в процесі Lurgi, до реактора необхідно вводити водяну пару (як джерело водню).

Висока температура цього процесу газифікації дає можливість виробництва пари в котлах-утилізаторах шляхом охолодження отриманого синтез-газу. Ця пара частково задовольнить потреби

підприємства. Для повного забезпечення потреб підприємства за процесом Prenflo також потрібна власна котельня, в якій передбачається спалювання 360 тис. т бурого вугілля.

Як котли-утилізатори, так і котельня поєднуються з потужностями з генерації електроенергії. Завдяки цьому потреби підприємства в електроенергії частково задовольняються за рахунок власного виробництва.

Недоліком процесу Prenflo є необхідність подрібнення вугілля до помелу тонщиною 0,01 мм, що ускладнює подачу сировини до реактора. Зазвичай це робиться шляхом транспортування вугільного пилу спеціальним трубопроводом в інертному середовищі (азоті чи діоксиді вуглецю).

У подальшому в процесі охолодження й очищення синтез-газу з'являється необхідність в обладнанні для вловлювання вугільного пилу, що не прореагував.

На відміну від попередніх процесів, процес Техасо передбачає газифікацію не вугілля, а водовугільної пульпи (суміш бурого вугілля і води у співвідношенні 1,5 : 1). Принциповою відмінністю цього процесу від попередніх є те, що основним джерелом водню для газифікації є не водяна пара, а та вода, яка входить до складу водовугільної пульпи. За переробки бурого вугілля, на відміну від кам'яного, внаслідок великої вологості сировини з водовугільної пульпи утворюється така кількість водяної пари, яка в декілька разів перевищує потребу для газифікації, а нерозкладена пара утворює величезну кількість стічних вод.

Як і в процесі Prenflo, процес Техасо передбачає подрібнення вугілля до класу менше 0,1 мм, що вимагає використання обладнання для вловлювання вугільного пилу, що не прореагував.

Узагальнення перелічених особливостей процесів, що розглядаються, дозволяє сформулювати такі їхні переваги та недоліки (табл. 3).

За асортиментом продукції, що виробляється, та технологічним режимом газифікації (передусім температура і тиск) найбільш привабливим виглядає процес Lurgi (за умови корисного використання буровугільної смоли).

Наступним кроком порівняння процесів газифікації є зіставлення їх матеріальних балансів. У табл. 4 наведено результати розрахунків матеріальних потоків, виконаних для різних процесів газифікації бурого вугілля.

Крім виробництва окремих продуктів газифікації, для подальшого синтезу вуглеводнів визначальним є співвідношення в синтез-газі кількості водню й оксиду вуглецю.

Хімізм процесу синтезу вуглеводнів висуває такі вимоги до співвідношення цих складових: кількість водню повинна бути більше кількості оксиду вуглецю принаймні у два рази.

Зазвичай при газифікації вугілля це співвідношення не витримується, і надлишкова кількість оксиду вуглецю окислюється до діоксиду та скидається в атмосферу разом із тим діоксидом вуглецю, що отримується безпосередньо в процесі газифікації.

Тому при характеристиці того чи іншого процесу газифікації необхідно розрізняти загальну кількість синтез-газу, що отримується при газифікації, та кількість синтез-газу, що має корисне використання (спрямовується на подальший синтез вуглеводнів). Останній характеризується тим, що складається виключно з водню й оксиду вуглецю в оптимальному співвідношенні (2 : 1). Розрахунок кількості синтез-газу оптимального складу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, та загальної кількості діоксиду вуглецю, що викидається в атмосферу, наведено в табл. 5. Під загальною кількістю діоксиду вуглецю розуміється сума таких складових:

- ✦ діоксид, що утворюється безпосередньо за газифікації вугілля;
- ✦ діоксид, що утворюється за спалювання надлишкового оксиду вуглецю;
- ✦ діоксид, що утворюється за спалювання метану генераторного газу.

Дані щодо складу синтез-газу різних процесів прийняті відповідно до [7]. Кількість синтез-газу наведено без урахування кількості аміаку та сірководню, які утворюються в процесі газифікації.

Аналіз даних, наведених у табл. 5, свідчить, що найбільш придатним для синтезу вуглеводнів є синтез газ, що отримується в процесі Lurgi. Саме в цьому процесі синтез-газ найбільше відповідає вимогам подальшого синтезу (співвідношення $H_2 : CO$ дорівнює 1,9 : 1). Також цей процес характеризується найвищим ступенем переходу вуглецю вихідного вугілля в синтез-газ, що спрямовується на подальшу переробку.

У процесі Prenflo, синтез-газ якого характеризується найгіршим співвідношенням $H_2 : CO$, отримується найменша кількість очищеного синтез-газу та найбільша кількість діоксиду вуглецю, який викидається в атмосферу.

Ще одна важлива особливість, яку потрібно враховувати при зіставленні окремих процесів, – це ступінь забезпеченості підприємства енергоресурсами власного виробництва. У табл. 6 наведено результати попередніх розрахунків потреби в окремих енергоресурсах.

Пара, необхідна для газифікації та інших процесів, виробляється на самому підприємстві. Якщо для процесу Lurgi необхідна пара отримується за спалювання частини вугілля в котельні, то в процесі Prenflo потреба в парі задовольняється шляхом використання тепла синтез-газу після реактора газифікації. У процесі Техасо газифікується водовугільна пульпа, тому потреби в парі немає.

Тепло синтез-газу використовується не тільки для отримання пари, а й для подальшого виробництва електроенергії. Завдяки цьому процеси

Порівняння основних процесів газифікації бурого вугілля

Процес	Переваги	Недоліки
Lurgi	Відносно низька температура і тиск процесу дозволяють використання більш дешевих конструкційних матеріалів для будівництва газогенераторів; отримання при охолодженні синтез-газу буровугільної смоли, яка потенційно може використовуватися в дорожньому будівництві	Вимоги до вологи вугілля вимагають попереднього підсушування; необхідність брикетування вугілля; низький тепловий потенціал синтез-газу не дозволяє отримувати пар у необхідній кількості; спалювання частини вугілля для виробництва пари погіршує екологічність процесу газифікації; утворювана буровугільна смола має вкрай низьку якість (великий вміст нерозчинних речовин, щільність і в'язкість), що ускладнює її кваліфіковану переробку
Prenflo	Підвищені (порівняно з процесом Lurgi) можливості щодо використання енергетичного потенціалу синтез-газу для забезпечення виробництва необхідними ресурсами водяної пари (тепловою енергією); висока інтенсивність процесу	Вимоги до вологи вугілля вимагають попереднього підсушування; ускладнена схема подачі вугільного пилу до реактора газифікації; високі температура і тиск вимагають використання більш дорогих конструкційних матеріалів (порівняно з процесом Lurgi)
Texasco	Низькі вимоги до вологості вугілля, що використовується; за газифікації водовугільної пульпи отримується, крім синтез-газу, велика кількість пари з високим енергетичним потенціалом, достатнім для виробництва значної кількості електроенергії	Найвищий тиск серед процесів, що розглядаються, вимагає використання більш дорогих конструкційних матеріалів; великий вміст вологи у бурому вугіллі разом із водою пульпи призводять до утворення в процесі газифікації великої кількості стічних вод, які потребують біохімічного очищення

Джерело: складено авторами.

Таблиця 4

Укрупнені матеріальні баланси процесів газифікації бурого вугілля (у розрахунку на річне виробництво)

Стадія виробництва	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Texasco
Прихід			
Переробка вугілля, тис.т фактичної маси	9000,0	9000,0	9000,0
У тому числі спрямовується на виробництво пари, тис. т	3643,0	460,0	–
Надається до реактору газифікації, тис. т	4339,2 *)	5124*)	9000,0
Подача кисню на газифікацію, млн. м ³	1968,0	1745,0	2600,0
Подача пари на газифікацію, тис. т	5342	2793	–
Вихід			
Синтез-газ (приведений до нормальних умов), млн м ³	5896,2	6162,3	6912,9
Смола буровугільна, тис. т	233,3	–	–
Сульфат амонію, тис. т	35,0	43,2	45,0
Сірчана кислота (за вирахуванням власного споживання), тис. т	168,2	207,6	216,3
Шлак від газифікації	662,7	783,9	852,0
Шлак від котельні	189,3	68,2	–
Стічні води, млн м ³	3495	1049	7605

Примітка: * – з урахуванням підсушування вугілля до вологи 19%.

Джерело: складено авторами.

Характеристика очищеного синтез-газу

Стадія виробництва	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Кількість синтез-газу, що надійшла на очищення, усього млн м ³	5896,2	6162,3	6912,9
Кількість синтез-газу в розрахунку на 1 т вугілля сухої маси, що надійшло на переробку, м ³	1705	1462	1574
Склад очищеного синтез-газу, % (об.)			
H ₂	40	30	35
CO	21	60	52
CO ₂	30	10	13
CH ₄	9	–	–
Співвідношення H ₂ : CO в синтез-газі до очищення	1,9 : 1	1 : 2	1 : 1,5
Кількість очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, млн м ³	3537,7	2773,1	3629,3
Загальна кількість CO ₂ , що скидається в атмосферу, млн м ³	2358,5	3389,2	3283,6
Частка вуглецю вихідного вугілля, що перейшла в підготовлений синтез-газ, %	33,3	21,4	26,9

Джерело: складено авторами, з урахуванням даних про склад синтез-газу, наведених у [7].

Таблиця 6

Потреба в енергоресурсах різних процесів газифікації

Енергоносій	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Потреба в парі, тис. т, усього	5342	2793	–
Вода технічна для отримання пари чи водовугільної пульпи та інших технологічних потреб, тис. м ³	5342	2793	13500
У тому числі:			
– пара котельні	5342	150	–
– пара, що отримується при газифікації та подальшому охолодженні синтез-газу	–	2643	4147
Потреба в електроенергії, МВт · год/рік	88443	354332	397517
У тому числі:			
– власне виробництво	–	216143	337889
– покупна електроенергія	88443	138189	59628
Частка електроенергії власного виробництва в загальному споживанні, %	–	61	85

Джерело: складено авторами.

Prenflo і Техасо дозволяють частково задовольнити потреби підприємства в електроенергії.

Отже, за критерієм енергонезалежності найбільшу перевагу має процес Техасо, тоді як процес Lurgi має найменшу привабливість.

Для оцінки екологічності процесу розраховано суму екологічного податку, ставки якого диференційовані за різними шкідливими речовинами та опосередковано враховують розмір шкоди, що наносить кожна речовина навколишньому середо-

вищу. Розрахунок виконано відповідно до вимог Податкового кодексу [8] і наведено в табл. 7.

Кількість буровугільного пилу, оксидів азоту та діоксиду сірки визначалось виходячи з кількості вугілля, що спалюється на котельні.

У розрахунках для процесів Lurgi та Prenflo враховано кількість діоксиду вуглецю, яка утворюється при роботі котельні. За всіма трьома процесами також враховано кількість цієї шкідливої речовини, що утворюється при очищенні синтез-газу.

Оцінка екологічності процесів газифікації

Показник	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Шкідливі речовини, що викидаються в атмосферу			
Буровугільний пил, т	1800	339	–
Діоксид сірки, т	48000	9028	–
Оксиди азоту, т	17600	3310	–
Діоксид вуглецю, тис. т	6510	7010	6450
Екологічний податок за викиди в атмосферу			
Загальна сума податку на викиди в атмосферу, тис. грн	364357,2	242096,2	193500,0
Податок в розрахунку на 1 т вугілля, що перероблюється	40,48	26,90	21,50
Податок в розрахунку на 1 тис. м ³ синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів	102,99	87,30	53,32

Джерело: складено авторами.

Найбільша сума екологічного податку, яка характерна для процесу Lurgi, пояснюється тим, що приблизно 20% вугілля, що надходить на переробку, спалюється в котельні для отримання пари.

Найкращі показники за викидами в атмосферу має процес Техасо, за яким все вугілля, що надходить на переробку, підлягає газифікації (без відволікання на отримання пари в котельні). Але висока конституційна волога бурого вугілля (51,2%) і подальша газифікація водовугільної пульпи, що також містить воду, призводить до утворення такої кількості стічних вод, яка буде загрожувати існуванню екосистеми басейну річки Сіверський Донець.

Саме ця обставина не дозволяє обрати цей процес для переробки бурого вугілля.

Отже, для впровадження, виходячи з кількості викидів в атмосферу та скидів у водні об'єкти шкідливих речовин, може бути рекомендований процес Prenflo.

Узагальнювальними показниками, за допомогою яких можна робити зіставлення окремих процесів, є такі економічні показники, як собівартість виробництва, продуктивність праці та питомі капіталовкладення на виробництво 1 тис. м³ підготовленого синтез-газу.

Оцінка витрат на виробництво очищеного та підготовленого для подальшої переробки синтез-газу здійснювалася відповідно до методики, яка застосовується на коксохімічних підприємствах за калькулювання собівартості коксу [9]. Вибір методики обумовлюється тим, що як виробництво коксу, так і виробництво синтез-газу належить до так званих «комплексних» виробництв, у процесі яких в єдиному технологічному процесі з єдиного

виду сировини отримується одночасно декілька продуктів. У нашому випадку, в процесі Lurgi, крім синтез-газу, отримується буровугільна смола; при очищенні синтез-газу – крім підготовленого газу, отримуються сульфат амонію та сірчана кислота. У таких випадках визначається загальна сума витрат на виробництво, яка потім розподіляється між окремими продуктами. Процедура розподілу загальної суми витрат виглядає таким чином:

- ✦ собівартість нецільових (попутних) продуктів (буровугільна смола, сульфат амонію, сірчана кислота) визначається виходячи з чинних цін за вирахуванням планової суми прибутку (так звана «тверда оцінка»);
- ✦ витрати на виробництво основного продукту (синтез-газу) визначається як загальна сума витрат на переробку за вирахуванням собівартості супутніх продуктів; саме решта витрат вважається собівартістю основного продукту.

Собівартість синтез-газу, підготовленого для подальшого використання (C), визначається такими чинниками:

- ✦ вартість бурого вугілля – грн/т (Ц);
- ✦ витрати бурого вугілля на отримання й очищення синтез-газу – т/тис. м³ (P);
- ✦ витрати на переробку бурого вугілля на синтез газ – грн/тис. м³ (B).

В узагальненому вигляді виробнича собівартість підготовленого синтез-газу може бути описана таким рівнянням:

$$C = Ц \cdot P + B. \quad (1)$$

До витрат на переробку бурого вугілля в синтез-газ у розрахунках віднесено витрати на:

- ✦ придбання технічної води та матеріалів для її підготовки;
- ✦ придбання електроенергії;
- ✦ оплату праці персоналу з відрахуваннями на єдиний соціальний внесок;
- ✦ амортизаційні нарахування.

Експертно оцінено та включено до складу витрат на переробку вугілля витрати на ремонт і утримання обладнання, а також загальновиробничі витрати. У складі витрат враховано суму екологічного податку.

Результати розрахунків витрат на переробку бурого вугілля за різними процесами наведено в табл. 8.

На даний час видобуток бурого вугілля в Україні відсутній, і його вартість не може бути достовірно оцінена. Враховуючи дані, наведені в табл. 4, 5, 8, вираз (1) для окремих процесів може мати такий вигляд:

- ✦ для процесу Lurgi: $2,5Ц + 100$;
- ✦ для процесу Prenflo: $3,2Ц + 330$;
- ✦ для процесу Техасо: $2,5Ц + 490$.

Аналіз цих залежностей показує, що за будь-якої ціни бурого вугілля процес Lurgi є найбільш привабливим за рівнем собівартості. Це пояснюється як витратами вугілля на 1 тис. м³ синтез-газу, так і великою кількістю буровугільної смоли (су-

путня продукція), на яку припадає велика частка загальної суми витрат на переробку вугілля.

Різні процеси газифікації порівнювалися також за продуктивністю праці та капіталоемністю окремих процесів (табл. 9).

Як свідчать наведені дані, найбільш привабливим процесом газифікації за показником «продуктивність праці» є процес Техасо, найменш привабливим – процес Prenflo. Щодо капіталоемності – маємо зворотну тенденцію: найбільш інвестиційно привабливим є процес Lurgi, найменш привабливим – процес Техасо.

Проведені порівняння дозволяють зробити висновок, що для газифікації бурого вугілля може бути використаний процес Lurgi. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на підвищення екологічності цього процесу. Одним із варіантів є заміна бурого вугілля при виробництві пари на інше паливо (метан газифікації, метан-етанова фракція, що отримується при синтезі моторних палив тощо).

Використання процесу Prenflo може бути доцільним, якщо вирішити проблему збагачення воднем очищеного синтез-газу. Додатковий водень може бути отриманий одним із відомих у промисловості процесів, які були розглянуті нами раніше [10].

Таблиця 8

Оцінка витрат на отримання й очищення за різними процесами газифікації синтез-газу, підготовленого для подальшого використання, грн/тис. м³

Процес газифікації	Сума витрат на переробку вугілля	Собівартість супутньої продукції (в розрахунку тис. м ³ синтез-газу)	Сума витрат, віднесених на собівартість синтез-газу (без урахування вартості вугілля)
Lurgi	700	600	100
Prenflo	700	370	330
Техасо	860	370	490

Джерело: складено авторами.

Таблиця 9

Техніко-економічні показники окремих процесів газифікації бурого вугілля

Показник	Процес Lurgi	Процес Prenflo	Процес Техасо
Кількість підготовленого синтез-газу, млн м ³	3537,7	2773,1	3629,3
Чисельність персоналу, осіб	2607	2495	2479
Продуктивність праці, тис. м ³ /особу	1357	1111	1464
Капіталовкладення, млн грн	16009,7	13712,2	22233,9
Капіталовкладення на 1 тис. м ³ очищеного синтез-газу, що спрямовується на синтез вуглеводнів, тис. грн/тис. м ³	4,525	4,945	6,126

Джерело: складено авторами.

Використання процесу Техасо для газифікації бурого вугілля можливо тільки в разі вирішення проблеми утилізації великої кількості стічних вод.

ВИСНОВКИ

1. Буре вугілля Ново-Дмитрієвського родовища є придатним для газифікації та подальшої переробки на синтетичні моторні палива;

2. Підсумовуючи проведені порівняння, можна зробити висновок, що для газифікації бурого вугілля Ново-Дмитрієвського родовища найбільш перспективним є процес Lurgi, який відрізняється від інших:

- ✦ найнижчою температурою і тиском процесу газифікації, що дозволяє використовувати більш дешеві конструкційні матеріали для будівництва реактора газифікації;
- ✦ більш широким асортиментом продукції, що отримується при газифікації;
- ✦ майже оптимальним складом синтез-газу за співвідношенням $H_2 : CO$;
- ✦ найменшими викидами діоксиду вуглецю, що утворюється при газифікації вугілля та підготовки синтез-газу для подальшого використання;
- ✦ найнижчою виробничою собівартістю підготовленого синтез-газу;
- ✦ найменшими питомими капіталовкладеннями (в розрахунку на 1 тис. m^3 підготовленого синтез-газу).

3. Застосування для газифікації бурого вугілля процесу Prenflo можливо за умови поліпшення складу синтез-газу для досягнення необхідного співвідношення $H_2 : CO$. Можливим варіантом вирішення проблеми оптимізації складу синтез-газу є додавання до нього водню, який отримується окремо від процесу газифікації.

4. Для зменшення шкідливих викидів в атмосферу за процесами Lurgi та Prenflo необхідно вирішити питання забезпечення виробництва парою без спалювання в котельні частини бурого вугілля.

5. Буре вугілля Ново-Дмитрієвського родовища має вологу в середньому на рівні 51,2%. Приготування з такого вугілля водовугільної пульпи з її подальшою газифікацією (як це передбачає процес Техасо) призводить до утворення великої кількості стічних вод, утилізація яких не є можливою.

В умовах Ново-Дмитрієвського родовища широкомасштабне застосування процесу Техасо призведе до негативних екологічних наслідків і може бути загрозою для екосистеми басейну річки Сіверський Донець.

У даному випадку це унеможливає використання процесу Техасо для газифікації бурого вугілля без вирішення проблеми утилізації великої кількості стічних вод. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Кизим М. О., Хаустова В. Є., Шпілевський В. В. та ін. Техніко-економічні засади створення підгалузі з виробництва рідкого синтетичного палива в Україні : монографія. Харків : ФОРМ Лібуркіна Л. М., 2022, 212 с.
2. Кизим М. О., Хаустова В. Є., Шпілевський В. В., Котляров Є. І. Технічні й економічні аспекти створення підгалузі з виробництва синтетичного рідкого палива в Україні. *Проблеми економіки*. 2022. № 4. С. 59–79.
DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2022-4-59-79>
3. Bhattacharyya S., Fan L., Azam S., Liu S. Advances in coal mining technology and sustainable mining techniques. In: *Woodhead Publishing Series in Energy. The Coal Handbook* (Second Edition). Woodhead Publishing, 2023. Vol. 1. P. 263–321.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824328-2.00011-X>
4. Zhou B., Chang J., Li J. et al. Two-stage gasification process simulation and optimization of pulverized coal for hydrogen-rich production using Aspen plus. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 49. Part D. P. 849–860.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.033>
5. Breault R.W. Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies. *Energies*. 2010. Vol. 3. Iss. 2. P. 216–240.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en3020216>
6. Cornils B., Hibbel J., Ruprecht P. et al. Gasification of hydrogenation residues using the Texaco coal gasification process. *Fuel Processing Technology*. 1984. Vol. 9. Iss. 3. P. 251–264.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(84\)90045-6](https://doi.org/10.1016/0378-3820(84)90045-6)
7. Рудика В. І. Порівняльний аналіз ефективності технологій зрідження вугілля. *Бізнес Інформ*. 2017. № 12. С. 317–324. URL: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2017-12_0-pages-317_324.pdf
8. Податковий кодекс. Закон України від 02.12.2010 р. № 2755-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>
9. Справочник коксохимика : в 6-ти томах. Т. 6 : Экономика, организация и управление коксохимическим предприятием / под ред. А. М. Приступы, Е. И. Ковалева, В. А. Корниловой. Харьков : ИД «ИНЖЕК», 2010. 320 с.
10. Шульга І. В., Кизим М. О., Котляров Є. І. Напрямки удосконалення технологій конверсії вугілля в синтетичні рідкі палива. *Вуглехімічний журнал*. 2023. № 6. 2023. С. 37–44.
DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-6-37-44>

REFERENCES

Bhattacharyya, S. et al. "Advances in coal mining technology and sustainable mining techniques". In

- Woodhead Publishing Series in Energy. *The Coal Handbook*, vol. 1, 263-321. Woodhead Publishing, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824328-2.00011-X>
- Breault, R.W. "Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies". *Energies*, vol. 3, no. 2 (2010): 216-240.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en3020216>
- Cornils, B. et al. "Gasification of hydrogenation residues using the Texaco coal gasification process". *Fuel Processing Technology*, vol. 9, no. 3 (1984): 251-264.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(84\)90045-6](https://doi.org/10.1016/0378-3820(84)90045-6)
- Kyzym, M. O. et al. "Tekhnichni i ekonomichni aspekty stvorennia pidhaluzi z vyrobnytstva syntetychnoho ridkoho palyva v Ukraini" [The Technical and Economic Aspects of Creating a Subsector for the Production of Synthetic Liquid Fuels in Ukraine]. *Problemy ekonomiky*, no. 4 (2022): 59-79.
DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2022-4-59-79>
- Kyzym, M. O. et al. *Tekhniko-ekonomichni zasady stvorennia pidhaluzi z vyrobnytstva ridkoho 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.
- [Legal Act of Ukraine] (2010). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>
- Rudyka, V. I. "Porivnialnyi analiz efektyvnosti tekhnolohii zridzhennia vuhillia" [The Comparative Analysis of the Efficiency of Coal Liquefaction Technologies]. *Biznes Inform*, no. 12 (2017): 317-324. https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2017-12_0-pages-317_324.pdf
- Shulha, I. V., Kyzym, M. O., and Kotliarov, Ye. I. "Napriamky udoskonalennia tekhnolohii konversii vuhillia v syntetychni ridki 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>
- Spravochnik koksokhimika : v 6-ti tomakh. T. 6 : Ekonomika, organizatsiya i upravleniye koksokhimicheskim predpriyatiem* [Handbook of Coke Chemist: in 6 volumes. Vol. 6: Economics, Organization and Management of a Coke-chemical Enterprise]. Kharkiv: ID «INZhEK», 2010.
- Zhou, B. et al. "Two-stage gasification process simulation and optimization of pulverized coal for hydrogen-rich production using Aspen plus". *International Journal of Hydrogen Energy*, part D, vol. 49 (2024): 849-860.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.033>