

<https://doi.org/10.15407/ggcm2024.195-196.073>

УДК 502.17:622.32+662.66/67/769.22

**Мирослав ПОДОЛЬСЬКИЙ, Олег ГВОЗДЕВИЧ,
Леся КУЛЬЧИЦЬКА-ЖИГАЙЛО**

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна,
e-mail: cencon@ukr.net

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ
НЕКОНДИЦІЙНИХ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ
ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ**

На території України розташовані всі види горючих корисних копалин – нафта, природний газ, газовий конденсат, вугілля, торф, горючі сланці, однак обсяги їхнього видобування та способи використання в сукупності не забезпечують необхідного рівня енергетичної безпеки держави. Додаткові труднощі в енергетичній сфері спричинили тривалі військові дії на сході та півдні країни. Тому завдання підвищення ефективності використання наявних некондиційних паливно-енергетичних ресурсів, зокрема в західному регіоні, є актуальним і своєчасним. Некондиційними горючими копалинами можна вважати балансові та позабалансові запаси первинних видів енергетичних матеріалів та обсяги вуглецевмісних відходів, які наразі через енергетичні чи геологічні умови не відповідають економічним критеріям видобування та використання традиційними способами.

Наведено порівняльний огляд відомих методів конверсії (перероблення) некондиційного палива, зокрема піролізу, гідрогенізації та газифікації. Показано, що за основними показниками найбільш придатними для екологічної конверсії некондиційного палива є методи газифікації. Представлено розроблені прямі та комбіновані способи екологічної конверсії некондиційних твердих горючих копалин та вуглецевмісних відходів з отриманням газоподібного, рідкого та твердого палива, а також розглянуто перспективи їхнього впровадження в західному регіоні України.

Ключові слова: некондиційні горючі копалини, вуглецевмісні відходи, екологічна конверсія, західний регіон України.

Стан проблеми. На території України розташовані всі види горючих корисних копалин – нафта, природний газ, газовий конденсат, вугілля, торф, горючі сланці, проте обсяги їхнього видобування та способи використання в сукупності не забезпечують необхідного рівня енергетичної безпеки держави. Додаткові труднощі в енергетичній сфері спричинили тривалі військові дії на сході та півдні країни. Недоступність більшості видобувних потужностей

первинних енергетичних ресурсів та суттєве зменшення теплової електрогенерації негативно вплинули на можливості соціально-економічного розвитку. На цьому фоні підвищення ефективності використання некондиційних паливно-енергетичних ресурсів, зокрема західного регіону, з врахуванням світової тенденції відновлення зацікавленості в екологічному використанні вичерпаного палива, відходів та біомаси є актуальним і своєчасним.

Некондиційними горючими копалинами можна вважати балансові та позабалансові запаси первинних видів енергетичних матеріалів та обсяги техногенних відходів вуглевидобутку, вуглезабагачення, нафтопереробки тощо, які наразі через фізико-хімічні, енергетичні чи геолого-просторові умови не відповідають економічним критеріям видобування та використання традиційними способами.

Зіставлення даних про запаси і видобуток горючих копалин в Україні (таблиця) показує, що запаси багатократно перевищують річний видобуток, а за окремими видами енергетичної сировини – у тисячі разів.

З аналізу запасів і видобутку горючих копалин в Україні видно, що енергетична сировина розподілена за територіями дуже нерівномірно, переважно у так званих гірничо-промислових регіонах на сході, в центральній частині і на заході країни. Аналогічно нерівномірно розміщені і вуглецевмісні відходи вуглевидобутку та вуглезабагачення. Щодо некондиційної енергетичної сировини, яка наразі за фізико-хімічними, енергетичними чи геолого-просторовими умовами не відповідає економічним критеріям видобування та використання традиційними способами, то її відсоток залежно від виду енергетичної сировини коливається від 50 до 90 %. Такі значні відсотки некондиційного первинного палива зумовлені тим, що у попередні десятиліття виробники першочергово видобували паливо з найкращими характеристиками за найсприятливіших умов розробки покладів і родовищ, оминаючи паливо з гіршими показниками і складнішими геологічними умовами та нехтуючи екологічними аспектами. Тому розвиток методів екологічної конверсії із залученням до енергетичного обігу некондиційних паливно-енергетичних ресурсів є актуальним в Україні загалом і для західного регіону зокрема.

Порівняльний огляд методів конверсії некондиційного палива. Проблема конверсії некондиційного палива є багатогранною і охоплює понад дві сотні років, від часу промислової революції в Англії в другій половині XVIII століття. На той час основним енергетичним ресурсом було дерево і вугілля, з яких спочатку отримували освітлювальний газ, а згодом і енергію для парових

Запаси і видобуток горючих копалин в Україні (Брик та ін., 2021)

Корисна копалина (енергетична сировина)	Одиниця виміру	Балансові запаси		Видобуток	
		Кількість	Кількість	% на рік від балансових запасів	
Природний газ	млн м ³	804 369	20 949	2,6044000 %	
Газовий конденсат	тис. т	39 795	679	1,7062400 %	
Нафта	«	99 986	1 622	1,6222300 %	
Вугілля буре	«	2 892 551	10	0,0000035 %	
Вугілля кам'яне	«	52 636 158	20 019	0,0003800 %	
Торф	«	767 974	646	0,0008412 %	

машин. Еволюція методів конверсії вугілля та вуглецевмісної сировини виокремила три основні технологічні підходи (Брик та ін., 2019; Фальбе, 1980; Шиллинг и др., 1986), зокрема:

1. *Піроліз та коксування.* До початку ХХ ст. піролізом та коксуванням кам'яного вугілля отримували паливо для металургії та більшість хімічних продуктів. Ці процеси базуються на нагріванні вугілля без доступу кисню (повітря). Піроліз здійснюють за різних температур залежно від призначення кінцевих продуктів: низькотемпературний піроліз (або напівкоксування) – за температур 500–600 °С з отриманням напівкоксу та рідких і газових продуктів; високотемпературний (або коксування) – за температури 900–1100 °С з отриманням коксу. Сучасні процеси напівкоксування бурого вугілля зорієнтовані переважно на отримання напівкоксу та синтетичного рідкого палива. Усього з газів коксування виробляють кілька десятків хімічних продуктів. Кокс піролізу використовують в металургії, а напівкокс (переважно після брикетування) – для отримання теплової енергії.

2. *Гідрогенізація.* Іншим процесом, який можна використовувати для отримання газових та рідких вуглеводнів є гідрогенізація вугілля. Принципова різниця в хімічному складі вугілля та нафти полягає у різному мольному співвідношенні водень/вуглець (0,7 – для вугілля і близько 1,2 – для нафти). Взаємодією вугілля з воднем в присутності каталізатора за відповідних значень тиску і температури можна отримати «синтетичну нафту».

У різних країнах зараз працює кілька (близько 80) дослідних установок прямої гідрогенізації вугілля, проте в промисловому масштабі такі технології ще не використовуються. Їхні основні недоліки – це низька продуктивність процесу, використання водню високого тиску, необхідність регенерації каталізаторів для повторного використання тощо.

3. *Газифікація.* При високотемпературному обробленні твердого палива його органічні складники розпадаються на газові та рідкі продукти. Перші процеси газифікації ґрунтувалися на термічному розкладі вугілля в автоклавах з отриманням висококалорійного світільного газу та коксу. Пізніше був запропонований спосіб отримання «водяного газу» з коксу. На початку 1900-х років спостерігалось значне зацікавлення у використанні генераторного газу в газових двигунах. Щоб отримати генераторний газ, використовували антрацит, що давало змогу уникати виділення смол, які негативно впливали на роботу двигунів.

Перші газогенератори були періодичної дії. Вибір конкретного типу реактора залежав від багатьох факторів, зокрема від способу використання кінцевого продукту, хімічних і фізичних властивостей вугілля, потрібної продуктивності газогенератора, методики утилізації побічних продуктів тощо. Згодом були запропоновані процеси і газогенератори неперервної дії, що значно підвищило продуктивність установок.

Потужний поштовх розвитку теорії і технологій використання вкопного вугілля (і вуглецевмісної сировини загалом) відбувся у 1926 р. в Німеччині після відкриття процесу синтезу суміші алканів з домішками олефінів з оксиду вуглецю і водню (CO і H_2 – синтез-газ) за наявності каталізаторів – металів VIII групи за температур 200–400 °С та тиску 0,1–1,0 МПа. Цю суміш успішно застосовували замість бензину, а тому вона отримала назву синтетичне рідке

паливо (СРП), або синтин. З того часу цей процес та його модифікації називаються синтезом Фішера–Тропша (ФТ-синтезом). У 1930-х в Європі з'явилися розробки газогенераторних двигунів на вантажному транспорті та тракторах.

Уже в 1936 р. були побудовані чотири заводи потужністю 200 тис. т на рік, а до 1943 р. у світі працювало п'ятнадцять заводів потужністю 1 млн т на рік, на яких вироблялося 700 тис т синтину.

У 1942–1944 рр. загальне виробництво СРП на базі твердих горючих копалин (бурого та кам'яного вугілля) у Німеччині склало близько 5 млн т на рік.

З середини 1960-х років розвиток технологій газифікації твердих палив (і вуглецевмісних відходів) спочатку пригальмувався, а згодом призупинився через появу на ринку палива дешевої нафти і природного газу, продукти з яких майже повністю витіснили використання твердих горючих копалини. Єдиною країною, яка не припинила випуск СРП, була Південно-Африканська Республіка (ПАР) (Фальбе, 1980; Шиллинг др., 1986). З 1955 р. в ПАР завод "Sasol-1" виробляв понад 230 тис т СРП на рік, а в 1980 р. довів його випуск до 350 тис т. В 1981 р. був уведений в експлуатацію комплекс "Sasol-2" з потужністю 1,9–2,1 млн т на рік, а в 1984 – комплекс "Sasol-3" такої самої потужності. У 1987 р. в ПАР виробляли на рік 4,5 млн т синтетичних вуглеводнів (бензин, газойль, парафіни тощо). У 1994 р. річний прибуток ПАР від продажу СРП, за одними джерелами, склав 767 млн доларів США, а за іншими – чистий прибуток після сплати податків – 474 млн доларів США. Загальний внесок вугільної промисловості в доходи ПАР від міжнародної торгівлі склав у 1994 р. 11,75 %, причому тільки завдяки виробництву синтетичного рідкого палива. Слід відзначити, що в ПАР експортні надходження від СРП займали четверте місце після алмазів, золота та платинових металів, хоча країна має значні запаси залізної руди, міді, марганцю та нікелю.

З початку ХХІ століття, у зв'язку з багатократним зростанням цін на нафту і природний газ, а також необхідністю покращення екології, зріс інтерес до технологій екологічного використання викопного палива. Основні дослідження та практичні розробки зосередилися на модернізації потужних теплових електростанцій на основі комплексного впровадження високоефективних технологій газифікації твердого викопного палива та вуглецевмісних відходів, з яких одержували очищені енергетичні гази для безпосереднього використання в інтегрованих системах виробництва електроенергії, до прикладу, Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies (Wang & Stiegel, 2016) – Технології комбінованого циклу інтегрованої газифікації.

Найвагоміші результати з впровадження технологій екологічної газифікації твердих вуглецевмісних палив (переважно бурого і кам'яного вугілля) в електроенергетику (теплові електростанції потужністю 250–950 МВт) продемонстрували американські компанії Chevron Техасо і Shell. У світі нараховується близько 85 діючих газифікаторів, з яких 36 у Азії, 28 у Європі та 21 у Північній та Південній Америці.

Основні складові технологій конверсії некондиційного твердого палива. Загалом усі технології конверсії некондиційного твердого палива (та вуглецевмісних відходів) мають три основні складові, зокрема:

1. Відбір і підготовка палива – регламентується технологічним процесом газифікації.

За фракційним складом розрізняють паливо пилоподібне – фракція до 0,5 мм, дрібнозернисте – 0,5–2 мм, дрібний горошок – 2–5 мм, горошок – 5–10 мм, крупний горошок – 10–25 мм, кускове – 25–75 мм, крупне – фракція більше ніж 75 мм), пульпа (водо-вугільна/паливна суспензія).

2. Технологічний процес газифікації – фізико-хімічні показники отримання газових та рідких продуктів з твердого палива.

За термобаричними умовами розрізняють низько- (до 450 °С), середньо- (до 750 °С) та високотемпературну (понад 750 °С) конверсію, що може здійснюватися за атмосферного тиску та під високим тиском. За способом обробки сировини існують процеси зі стаціонарним шаром, у кип'ячому шарі, псевдозрідженому стані, у розплаві. За газифікуючими реагентами розрізняють повітряне, кисневе, пароводяне дуття. За видаленням шлаку – твердий залишок, розплав. За характером процесу – однопрохідні та циклічні, одно- та багатоступінні, комбіновані (використання різних процесів в одній технології), окремі та інтегровані у виробничі цикли, а також за рівнем емісії супутніх забруднюючих речовин та екологічної безпеки.

3. Види та використання отримуваних продуктів.

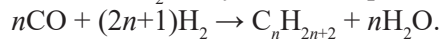
За видами отримуваних продуктів розрізняють кондиційне тверде паливо (напівкокс і кокс – використовуються в металургії і тепловій електроенергетиці); синтез-газ (СО і Н₂) для отримання енергетичного газового палива, використовується в інтегрованих системах теплової електроенергетики, ФТ-синтезу рідкого палива та виробництва інших хімічних речовин.

Описані вище складові відображають різноманіття сучасних методів екологічної конверсії некондиційних паливно-енергетичних ресурсів та можливості їхньої адаптації до вирішення практичних завдань сталого розвитку енергетичної та хімічної галузей.

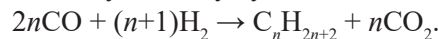
Відзначимо, що інтегровані системи, у яких поєднано високотемпературну газифікацію пилоподібного палива в кип'ячому шарі з кисневим дуттям під тиском, рідким шлаковидаленням, очисткою отриманих енергетичних газів та їхнє пряме використання в парогазових електроустановках, призначені для модернізації потужних теплових електростанцій, що потребує значних фінансових та матеріальних затрат і часу. Тому на сьогодні впровадження в Україні інтегрованих систем газифікації твердих горючих копалин та вуглецевмісних відходів можливе лише за окремими цільовими інвестиційними проектами.

Незважаючи на певну ейфорію на початку 2000-х щодо тотальної заміни викопного палива відновлювальними джерелами енергії, у світі та Україні продовжуються дослідження та розробка нових способів використання вугілля, зокрема для виробництва моторного палива (Брик та ін., 2014; Котляров та ін., 2024).

Синтез вуглеводнів з СО і Н₂ відбувається за реакцією



Продукти синтезу містять різні вуглеводні – від пропану до твердих парафінів. Вода синтезу, що утворюється за цією реакцією, взаємодіючи з СО, може вступати в реакцію рівноважного синтез-газу. Сумарне рівняння синтезу Фішера–Тропша в цьому випадку буде виглядатиме так:



Залежно від очікуваного продукту (розчинник, бензин, дизпаливо тощо) підбирається співвідношення $\text{CO}:\text{H}_2$. Теоретичний вихід синтетичних вуглеводнів з газу, який містить тільки CO і H_2 , при 100 % перетворенні CO , становить 0,208 кг з 1 nm^3 газу. З одного кілограма вуглецю можна отримати 4 nm^3 синтез-газу, а отже, граничний вихід вуглеводнів – 0,832 кг з 1 кг вуглецю. На практиці досягається 85 % від вказаної величини, тобто 0,71 кг.

Таким чином, використання викопного палива на більш високому екологічному рівні зберігає свою актуальність у світі та Україні (Подольський та ін., 2021).

Розвиток методів екологічної конверсії локальних горючих копалин.

Досвід роботи енергетичної системи України у 2022–2024 роках в умовах воєнного стану показав, що її доцільно доповнювати розподіленою генерацією електричної та теплової енергії (засобами так званої «малої енергетики»), зокрема на основі використання локальних паливно-енергетичних ресурсів. Такий підхід дозволяє підвищити стійкість енергетичної системи та надійність забезпечення споживачів.

Однак виявилось, що існує недостатня вивченість проблеми впровадження малої енергетики та брак технологічних рішень для ефективного використання запасів локальних некондиційних паливно-енергетичних ресурсів. Розвиток методів екологічної конверсії локальних горючих копалин розглянемо на прикладі кількох запатентованих корисних моделей.

Спосіб термічного перероблення вуглецевмісної сировини (Подольський та ін., 2020b). Корисна модель може бути використана для конверсії сапропелітового вугілля, відходів вуглевидобутку, бурого вугілля, торфу, відходів деревини, твердих побутових відходів та іншої вуглецевмісної сировини з отриманням, до прикладу, напівкоксу, вугільної смоли та горючих газів, які можуть використовуватися в енергетичних цілях та для виробництва різних хімічних продуктів. Корисну модель наведено на рис. 1.

Керованим порційним дозатором 1 регулюють об'єм порції завантажувальної сировини. Дозатор 1 закріплюють у верхній частині нерухомого корпусу 2 над сектором 1с (рис. 1, а).

Всередині нерухомого корпусу 2 розміщують рухомий барабан 3, який має зовнішню трубу, дванадцять розділених вертикальними перегородками секцій та центральну вісь, приєднану до керованого приводу 4 (регулює швидкість обертання барабана 3).

Порції сировини в секції барабана 3 подають дозатором 1 при суміщенні секції з сектором 1с нерухомого корпусу 2. Гази термічного перероблення із секцій барабана 3 через газозбірну трубу 5 направляють у бойлер-сепаратор 6, де їх охолоджують і розділяють на водосмоляну суміш та горючі гази. Останні накопичують та подають для подальшого використання і частково у підвідну газову трубу 7 до газового регулятора 8. На початку процесу вмикають привід 4 барабана 3, завантажують сировину і через газовий регулятор 8 подають природний газ через трубу живлення 9 до пальника 10 для нагрівання порцій сировини у секціях барабана 3.

Досягнення процесом перероблення заданого температурного режиму контролюють за допомогою встановлених у верхній частині нерухомого корпусу 2 за секторами 2с, 3с, ..., 10с датчиків температури (на рис. 1 не показані).

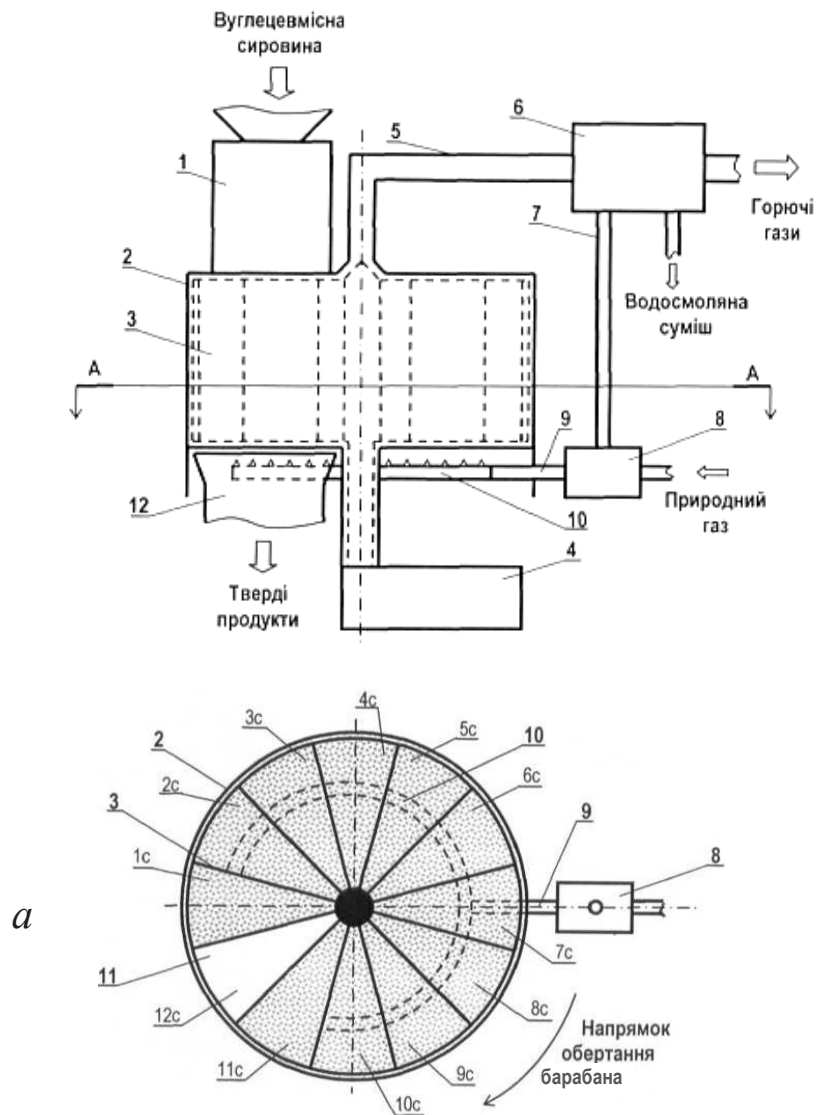


Рис. 1. Спосіб термічного перероблення вуглецевмісної сировини (*a* – розріз А–А): 1 – керований порційний дозатор; 2 – нерухомий корпус; 3 – рухомий барабан; 4 – керований привід барабана; 5 – газозбірна труба; 6 – бойлер-сепаратор; 7 – підвідна газова труба; 8 – керований газовий регулятор; 9 – живлення пальника; 10 – пальник; 11 – отвір у нижній частині нерухомого корпусу 2; 12 – приймач твердих продуктів; 1с, 2с, ..., 12с – сектори нерухомого корпусу 2

Після надходження газів термічного перероблення у бойлер-сепаратор 6 та вуглеводневих газів у підвідну газову трубу 7, регулятором 8 зменшують або припиняють подачу природного газу і відкривають подачу отриманих вуглеводневих газів через підвідну трубу 7 та трубу живлення 9 до пальника 10. Пальником 10 підігрівають знизу корпус 2 у секторах 2с, 3с, ..., 10с та порції сировини у відповідних секціях барабана 3. Видалення твердих продуктів перероблення, до прикладу, напівкоксу з секцій барабана 3 здійснюють при суміщенні секції із сектором 12с через вивантажувальний отвір 11 у нижній

частині нерухомого корпусу 2 та приймач твердих продуктів 12, що розташований під сектором 12с.

Корисну модель реалізують так.

Вуглецевмісну сировину, до прикладу, сапропелітове вугілля, подрібнюють до фракції 2–5 мм і подають до керованого порційного дозатора 1, який регулює об'єм порції завантажувальної сировини. Барабан 3 рівномірно обертають в корпусі 2 зі швидкістю, яку задають керованим приводом 4. При суміщенні секції барабану 3 із сектором 1с, у секцію дозатором 1 завантажують наступну порцію сировини (у попередній період часу, коли ця секція співпадала з сектором 12с, з неї через отвір 11 були вивантажені тверді продукти термічного перероблення попередньої порції сировини). У наступний період часу завдяки обертанню барабана 3 завантажувальну секцію переміщують у сектор 2с, де порцію сировини починають нагрівати пальником 10. Газу термічного перероблення з нижніх шарів проходять через верхні шари порції сировини, підігрівають їх і через газозбірну трубу 5 надходять у бойлер-сепаратор 6. Одночасно порцію сировини у секції барабана 3, яка в попередній період часу співпадала із сектором 2с, переміщують у наступний сектор 3с і продовжують нагрівати та подавати газу термічного перероблення через газозбірну трубу 5 у бойлер-сепаратор 6. У наступні періоди часу при переміщенні секції барабана 3 за секторами 4с, 5с, ... до сектора 10с порції сировини поступово нагрівають до температури близько 550 °С. Час нагрівання регулюють шляхом зміни швидкості переміщення секцій барабана 3 з сировиною у горизонтальній площині навколо вертикальної осі барабана 3. При досягненні секцією барабана 3 сектора 11с, нагрівання порції сировини припиняють (пальник 10 не нагріває сектор 11с) і в наступний період часу, коли ця секція досягає сектора 12с, з неї вивантажують тверді продукти через отвір 11 та приймач 12.

Запропонований спосіб термічного перероблення вуглецевмісної сировини відрізняється неперервністю процесу, забезпечує використання сировини з різними фізико-хімічними характеристиками та отримання продуктів перероблення зі стабільним компонентним складом.

Керований порційний дозатор 1 регулює подачу порції сировини в межах 10–90 % від об'єму секції рухомого барабана 3, менші об'єми порції застосовують для сировини з нижчою питомою теплопровідністю та міцнішою зв'язаністю вуглеводневих сполук. Керований привід 4 регулює швидкість обертання барабану 3 в межах 20–120 обертів на годину, що визначає тривалість термічного перероблення порції сировини, менші швидкості обертання барабана 3 застосовуються для сировини, яка потребує більше часу для перероблення. Керований газовий регулятор 8 задає кількість подачі газу до пальника 10, що визначає температуру процесу (максимально до 550 °С), більші кількості подачі газу до пальника застосовують для сировини, яка потребує більш високої температури для перероблення.

Сталий компонентний склад продуктів термічного перероблення забезпечується однорідністю вуглецевмісної сировини та змішуванням у газозбірній трубі 5 і бойлері-сепараторі 6 газів термічного перероблення порцій сировини з різних секцій барабана 3, у яких підтримуються по наростаючій різні температури за секторами 2с, 3с, ..., 10с.

Реактор для термічного перероблення вуглецевмісної сировини (Подольський та ін., 2020а). Ця корисна модель (рис. 2) є розвитком способу термічного перероблення (див. рис. 1).

Пропонована корисна модель реактора відрізняється від попереднього способу такими удосконаленнями:

– внутрішня сторона секцій (ближча до осі 3) рухомого барабана відділена від неї внутрішньою трубою, яка усуває контакт осі з порціями нагрітої сировини (зменшує температурні деформації осі та продовжує термін роботи барабана);

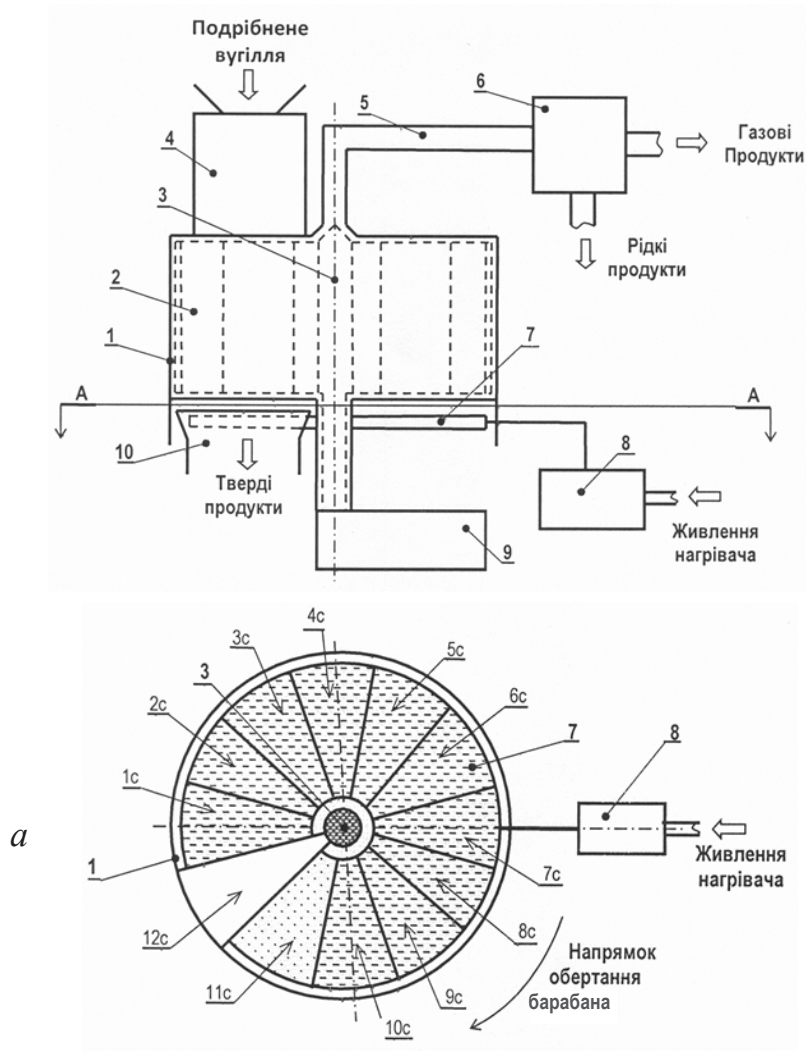


Рис. 2. Реактор для термічного перероблення вуглецевмісної сировини (а – розріз А–А): 1 – нерухомий корпус реактора; 2 – рухомий барабан із секціями для вугілля; 3 – вісь рухомого барабана; 4 – порційний дозатор подрібненого вугілля; 5 – газозбірна труба; 6 – роздільник фаз газових і рідких продуктів; 7 – секційний нагрівач; 8 – пульт управління температурою нагрівання секцій; 9 – привід рухомого барабана; 10 – приймач твердих продуктів; 1с, 2с, ..., 10с – секції нагрівача 7 під нерухомим корпусом 1; 11с – сектор розташування секції з вугіллям без нагрівання; 12с – сектор розташування отвору для вивантаження твердих продуктів у приймач 10

- газовий паливник замінено на електричний нагрівач, який дозволяє нагрівати сировину в секціях до різної температури;
- керований газовий регулятор замінено на електричний, який задає окрему температуру для кожної секції;
- нагрівання секції в останньому секторі 11с перед вивантаженням твердих продуктів не проводиться.

Термічне перероблення вуглецевмісної сировини в пропонованому реакторі реалізують подібно до описаного раніше способу (див. рис. 1) з відмінностями, що підвищують ефективність процесу.

Секційний нагрівач 7, який має 10 секторів (1с–10с, рис. 2, а), розташовують під нерухомим корпусом 1. Пультом управління температурою секцій 8 встановлюють окрему температуру для кожного сектора електричного нагрівача (250–750 °С). Керованим приводом 9 регулюють швидкість обертання барабана 2, що задає загальний час перероблення порцій сировини.

Далі, при обертанні барабана, секції з вуглецевмісною сировиною переміщують в горизонтальній площині над нагрівачем 7, що забезпечує відповідне нагрівання порцій сировини в секціях. Швидкість переміщення секцій (обертання барабана) встановлюється такою, щоб вихід цільових продуктів був максимальним.

Таким чином, у пропонованому реакторі досягаються такі результати:

- нагрівання сировини в кожній із секцій до попередньо визначеної температури (250–750 °С) адаптує процес перероблення до отримання стабільних фізико-хімічних характеристик цільових продуктів;
- температура 250 °С (750 °С) відповідає нижній (верхній) границі деформування вуглеводневих компонентів сировини, що призводить до виділення відповідних газових і рідких складових та стабілізації твердих продуктів;
- можливість встановлення різної температури нагрівання сировини для кожної секції (або однакової температури для кількох суміжних секцій) дозволяє регулювати співвідношення вмісту бажаних складових у газових та рідких продуктах;
- установа швидкості переміщення секцій за максимальним виходом цільових продуктів оптимізує продуктивність процесу перероблення.

Спосіб комбінованої конверсії некондиційного вугілля (Гвоздевич та ін., 2024). Технологічну схему способу комбінованої конверсії некондиційного вугілля наведено на рис. 3.

Технологічна схема реалізації способу комбінованої конверсії некондиційного вугілля включає трубчастий змієвиковий реактор 1 для отримання синтез-газу $\text{CO} + \text{H}_2$, лінію 2 відбору частини потоку водовугільної пульпи, лінію 3 відбору частини потоку отриманого синтез-газу, теплообмінник 4 для підігріву пульпи синтез-газом з одночасним охолодженням синтез-газу пульпою, вертикальний шахтний реактор 5 кускового вугілля. У реакторі 5 по висоті (згори донизу) підтримуються три температурні зони: T_1 – 400–450 °С, T_2 – 900–1000 °С, T_3 – 900–500 °С.

Реактор 5 обладнано ввідними колекторами зі штуцерами: 6 – для подачі частини синтез-газу від змієвикового реактора в температурну зону T_1 ; 7 – для введення підігрітої частини пульпи в температурну зону T_2 ; 8 – для подачі частини синтез-газу від змієвикового реактора 1 в температурну зону T_3 .

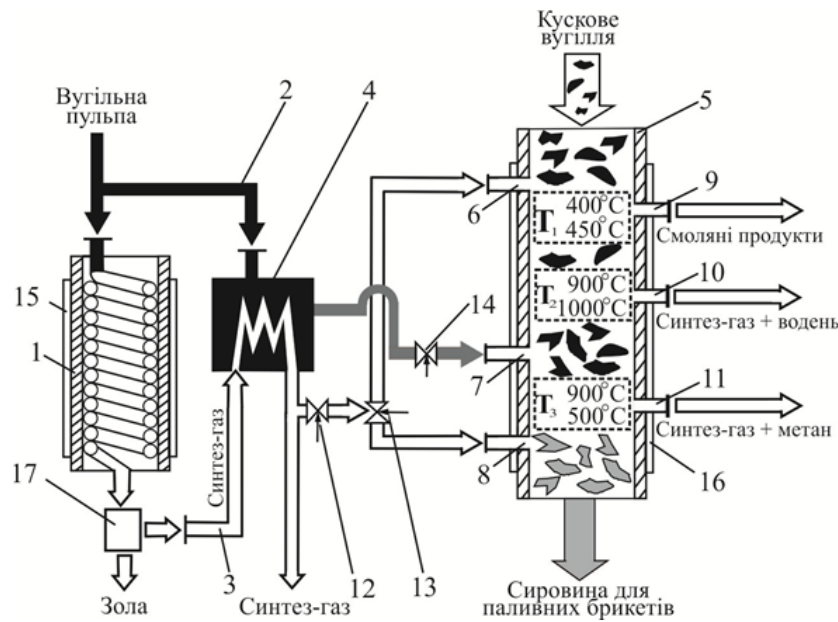


Рис. 3. Технологічна схема способу комбінованої конверсії некондиційного вугілля: 1 – трубчастий змієвиковий реактор; 2 – лінія відбору частини потоку водовугільної пульпи; 3 – лінія відбору частини потоку синтез-газу; 4 – теплообмінник; 5 – шахтний реактор кускового вугілля; 6 – штуцер подачі синтез-газу; 7 – штуцер подачі пульпи; 8 – штуцер подачі синтез-газу; 9–11 – штуцери продуктів; 12–14 – вентилі; 15, 16 – зовнішні обігрівачі; 17 – відділювач золи

А також вивідними колекторами зі штуцерами: 9 – для парогазових смоляних продуктів; 10 – для підсиленого воднем синтез-газу; 11 – для збагаченого метаном синтез-газу.

Для регулювання подачі синтез-газу слугують вентилі 12, 13, а подачу пульпи в реактор 5 регулюють вентилем 14. Необхідні температурні режими в реакторах 1 і 5 підтримуються зовнішніми обігрівачами 15 і 16 відповідно. Причому обігрівач 16 забезпечує температурні зони T_1 , T_2 , T_3 , у яких проходять процеси конверсії некондиційного кускового вугілля та введеної в реактор 5 підігрітої частини пульпи. На виході змієвикового реактора 1 облаштовано відділювач золи 17.

Реактор працює так.

Вугільну пульпу (шлам дрібного вугілля з водою у співвідношенні 1 : 1) подають в трубчастий змієвиковий реактор 1, у якому проходять хімічні реакції з утворенням синтез-газу $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$, частину якого з лінії 3 відбору газу регулюючими вентилями 12 і 13 направляють у вертикальний шахтний реактор кускового вугілля 5.

У реакторі 5 процес піролізу кускового вугілля організують так, що зону з температурою $T_2 - 900-1000\text{ }^\circ\text{C}$ створюють у середній частині, вище якої сформована температурна зона $T_1 - 400-450\text{ }^\circ\text{C}$. Одну частину газового потоку 3 синтез-газу $CO + H_2$ рівномірно подають через перфорований колектор зі штуцером 6 вище температурної зони T_1 , у якій утворюються якісні парогазові смоляні продукти. Парогазові смоляні продукти відводять через колектор зі штуцером 9 до споживача.

Другу частину газового потоку 3 синтез-газу подають через колектор зі штуцером 8 до температурної зони T_3 , у якій відбувається збагачення синтез-газу метаном за участю елементів C, CO і H_2 . Відтак збагачений метаном синтез-газ відводять через колектор зі штуцером 11 до споживача.

Додатково у середню високотемпературну зону T_2 реактора 5 через колектор зі штуцером 7 вводять частину потоку 2 водовугільної пульпи, підігріту в теплообміннику 4.

У температурній зоні T_2 відбувається реакція напівкоксу з водяною парою за схемою $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$, що додає до газового продукту «водяний газ». Підсилений воднем синтез-газ відводять через штуцер 10.

У теплообміннику 4 вугільною пульпою охолоджують синтез-газ до температури 320 °С, що стабілізує його склад та усуває рекомбінацію складових.

Для отримання цільових продуктів потоки 2 та 3 пульпи та синтез-газу регулюють вентилями 15, 12 і 13 відповідно, а попередню очистку синтез-газу зі змієвикового реактора 1 проводять у відділювачі золи 17, до прикладу, циклонного типу.

Окрім газових і смоляних продуктів, на виході реактора 5 отримують сировину для виробництва вугільних паливних брикетів.

Засади впровадження екологічної конверсії некондиційних паливно-енергетичних ресурсів західного регіону України. Розглядаючи розвиток методів екологічної конверсії некондиційних паливно-енергетичних ресурсів, слід відзначити їхню актуальність для західного регіону України.

Цей регіон характеризується насиченістю енергетичними об'єктами, родовищами нафти і газу, покладами кам'яного та бурого вугілля і торфу, магістральними та локальними енергетичними мережами, підприємствами генерації електричної та теплової енергії. Ці об'єкти є в користуванні або ними володіють суб'єкти господарювання різних форм власності та організаційної структури – приватні, акціонерні, державні, з іноземним капіталом тощо.

Оскільки проблеми підвищення ефективності паливно-енергетичного комплексу та збереження природного середовища набули національного значення, то для їхнього вирішення слід застосовувати відповідні інструменти впливу національного та регіонального рівня.

На національному рівні можна рекомендувати прийняття законодавчих актів, державних стандартів, регламентів та інших нормативних документів щодо використання методів екологічної конверсії некондиційних паливних ресурсів. Важливим є також і провадження державної політики сприяння розвитку методів екологічної конверсії та популяризації їхнього впровадження в Україні.

На регіональному рівні такими інструментами могли б бути проведення локальних виставок, конференцій, семінарів, зокрема міжнародних, та інших публічних заходів для ознайомлення органів місцевого самоврядування, господарських структур та громадськості з характеристиками і можливостями сучасних методів та технологій екологічної конверсії паливних ресурсів.

Позитивний вплив на вирішення проблеми могли би мати розроблення і реалізація державних і/або регіональних програм впровадження методів екологічної конверсії некондиційних паливних ресурсів, в яких були би окреслені можливі джерела, обсяги і механізми залучення відповідних фінансових та матеріальних засобів, зокрема і з іноземних джерел.

Висновки:

1. Встановлено, що серед відомих основних методів перероблення некондиційного палива, зокрема піролізу, гідрогенізації та газифікації за типами перероблюваної сировини, показниками технологічних процесів та характеристиками отримуваних продуктів найбільш придатними для екологічної конверсії некондиційного палива та вуглецевмісних відходів є методи газифікації. Вони можуть ефективно використовуватися, як для розподіленої генерації електричної та теплової енергії, так і в складі потужних інтегрованих енергетичних систем.

2. Розвиток методів екологічної конверсії розмаїтої вуглецевмісної сировини зумовив зростання зацікавленості в екологічному використанні викопного палива, відходів та біомаси в поєднанні з відновлювальними джерелами енергії в централізованих та розподілених енергетичних системах.

3. Доведено, що для підвищення стійкості та надійності забезпечення споживачів необхідно підсилувати інтегровані енергетичні системи засобами та мережами розподіленої генерації електричної та теплової енергії, зокрема на основі використання локальних некондиційних паливно-енергетичних ресурсів та вуглецевмісних відходів.

4. Представлено розроблені прямі та комбіновані методи екологічної конверсії некондиційних твердих горючих копалин та вуглевмісних відходів з отриманням газоподібного, рідкого та твердого палива, а також розглянуто перспективи їхнього впровадження в західному регіоні України.

Брик, Д., Гвоздевич, О., Кульчицька-Жигайло, Л., & Подольський, М. (2019). Техногенні вуглевмісні об'єкти Червоноградського гірничопромислового району та деякі технічні рішення їхнього використання. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 4(181), 45–65. <https://doi.org/10.15407/ggcm2019.04.045>

Брик, Д. В., Подольський, М. Р., & Гвоздевич, О. В. (2014). Фізико-технічне обґрунтування виробництва синтетичного палива з вугілля (на прикладі Львівсько-Волинського басейну). *Углемімічний журнал*, 3–4, 69–74. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukhj_2014_3-4_14

Брик, Д., Подольський, М., Хоха, Ю., Любчак, О., Кульчицька-Жигайло, Л., & Гвоздевич, О. (2021). Некондиційні вуглецевмісні горючі копалини та способи їхнього термохімічного перероблення. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 1–2(183–184), 89–109. <https://doi.org/10.15407/ggcm2021.01-02.089>

Гвоздевич, О. В., Подольський, М. Р., Кульчицька-Жигайло, Л. З., Побережський, А. В., & Бучинська, І. В. (2024). *Спосіб комбінованої конверсії некондиційного вугілля* (Заявка на видачу патенту України на винахід (корисна модель) від 30.04.2024). Рішення про державну реєстрацію корисної моделі, «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» (УКРНОІВІ) від 10.10.2024 р.

Котляров, Є. І., Шульга, І. В., Кизим, М. О., & Хаустова, В. Є. (2024). Техніко-економічна оцінка різних способів газифікації бурого вугілля для виробництва синтетичного моторного палива. *Бізнес Інформ*, 2, 128–138. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-2-128-138>

Подольський, М., Брик, Д., Кульчицька-Жигайло, Л., & Гвоздевич, О. (2021). Використання горючих копалин в контексті цілей сталого розвитку України та глобальних змін навколишнього середовища. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 3–4(185–186), 109–125. <https://doi.org/10.15407/ggcm2021.03-04.109>

Подольський, М. Р., Гвоздевич, О. В., Брик, Д. В., & Хоха, Ю. В. (2020a). *Реактор для термічного перероблення вуглецевмісної сировини* (Патент на корисну модель України № 144101). Бюлетень, 17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1451514/>

- Подольський, М. Р., Гвоздевич, О. В., Брик, Д. В., & Хоха, Ю. В. (2020b). *Способ термічного перероблення вуглецевмісної сировини* (Патент на корисну модель України № 141323). Бюлетень, 7. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1423059/>
- Фальбе, Ю. М. (1980). *Химические вещества из угля*. Москва: Химия.
- Шиллинг, Г., Бонн, Б., & Краус, У. (1986). *Газификация угля: горное дело – сырье – энергия*. Москва: Недра.
- Wang, T., & Stiegel, G. J. (2016). *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100167-7.00001-9>

Стаття надійшла:
18.07.2024 р.

**Myroslav PODOLSKY, Oleg GVOZDEVICH,
Lesya KULCHYTSKA-ZHYGAYLO**

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals
of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine,
e-mail: cencon@ukr.net

EVOLUTION OF ECOLOGICAL CONVERSION METHODS OF UNCONVENTIONAL COMBUSTIBLE MINERALS AT THE WESTERN REGION OF UKRAINE

All types of combustible minerals are located on the territory of Ukraine – oil, natural gas, gas condensate, coal, peat, oil shale, but the amounts of their extraction and methods of use in total do not ensure the necessary level of energy state security. The additional difficulties in the energy sector were created by long-term hostilities in the east and south parts of the country. The unavailability of most extraction capacities of primary energy resources and the loss of a significant part of electricity generation negatively affected the possibilities of socio-economic development. Against this background, increasing the efficiency of the use of unconventional fuels and energy resources, in particular in the western region, taking into consideration the global trend of renewed interest in the ecological use of fossil fuels, waste and biomass, is relevant and timely.

In the general case, unconventional combustible minerals can be included on-balance and off-balance reserves of primary types of energy materials and amounts of technogenic wastes from coal mining, coal beneficiation, oil refining etc., which by its energy or geological-spatial conditions, currently not meet the economic criteria for extraction and use by traditional methods.

The article provides a comparative overview of known methods of conversion (processing) of unconventional fuel, in particular pyrolysis, hydrogenation and gasification. It is shown that according to the types of processed raw materials, indicators of technological processes and characteristics of the obtained products, gasification methods are the most suitable for ecological conversion of unconventional fuels and wastes. The developed direct and combined methods of ecological conversion of unconventional solid combustible fossils and carbon-containing wastes to obtain gaseous, liquid and solid fuels are presented, as well as the prospects of their implementation in the western region of Ukraine are considered.

Keywords: unconventional combustible minerals, carbon-containing wastes, ecological conversion, western region of Ukraine.