

**Дмитро БРИК, Мирослав ПОДОЛЬСЬКИЙ, Юрій ХОХА,  
Олександр ЛЮБЧАК, Леся КУЛЬЧИЦЬКА-ЖИГАЙЛО, Олег ГВОЗДЕВИЧ**

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

### **НЕКОНДИЦІЙНІ ВУГЛЕЦЕВМІСНІ ГОРЮЧІ КОПАЛИНИ ТА СПОСОБИ ЇХНЬОГО ТЕРМОХІМІЧНОГО ПЕРЕРОБЛЕННЯ**

Проаналізовано структуру споживання первинних енергетичних ресурсів у світі та в Україні зокрема. Показано, що в останні десятиріччя частка вугілля стабільно становить 25–30 % і не виявляє тенденції до зменшення. Аналогічні закономірності спостерігаються і в Україні. Встановлено, що в Україні енергетичний потенціал запасів некондиційної вуглецевмісної сировини співрозмірний з покладами кондиційного вугілля і може бути використаний для підвищення енергетичної забезпеченості країни. Водночас погіршення екологічних показників довкілля вимагає підвищення рівня екологічної безпеки при використанні вуглецевмісної сировини та відповідної екологічної модернізації способів її термохімічної конверсії.

Наведено огляд способів термохімічного перероблення некондиційної вуглецевмісної сировини (піроліз та коксування, гідрогенізація, газифікація) і показано, що процес газифікації, який дозволяє переробляти різноманітні некондиційні тверді горючі копалини в наземних та підземних умовах, є найбільш перспективним для екологічно безпечного використання вугілля в країні.

*Ключові слова:* енергетичні ресурси, вуглецевмісні горючі копалини, вугілля, екологічна конверсія.

**Енергетичні ресурси та некондиційні вуглецевмісні палива.** Останні десятиріччя характеризуються зростанням виробництва енергії та збільшенням споживання первинних енергоносіїв, необхідних для її отримання, що призводить до вичерпання традиційних джерел енергії. Ще 1975 р. Е. Уолтерс показав, що рівень національного доходу майже пропорційний до споживання енергії, причому насамперед використовуються найдоступніші і технологічно вигідніші джерела енергії: соціально-економічний розвиток потребує енергоресурсів (Walters & Wewerka, 1975).

*Структура та споживання енергетичних ресурсів у світі.* Споживання палива у світі 2019 року склало 14,01 млрд т н. е., чи 19,85 млрд т у. п., у структурі споживання 33,1 % припадає на нафту, 24,2 % – газ, 27 % – вугілля,

відновлювані джерела – 5 %, гідроенергетика – 6,4 %, атомна енергетика – 4,3 % (*Statistical Review of World Energy*, 2020).

Виробництво і прогноз споживання енергетичних ресурсів із 1950 по 2050 р., за даними (Ион, 1984; Duncan, 1981), наведено в табл. 1 і на рис. 1.

Порівнюючи сьгоднішні фактичні дані із прогнозованими тридцять років тому, бачимо, що сумарне фактичне споживання енергії незначно відрізняється від передбачуваного, однак фактична структура споживання упродовж цих років змінилася в бік збільшення використання нафти, газу і вугілля. Частка гідроенергії та енергії з відновлюваних джерел у світовому споживанні відповідає прогнозованому.

Т а б л и ц я 1. Світове виробництво і прогноз споживання енергетичних ресурсів у 1950–2050 рр., млрд т н. е.

Вид ресурсу \ Роки	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2025	2050
Вугілля і лігніт	1,1	1,5	1,65	2,02	2,4	3,2	3,8	4,35	4,61	6,5
Нафта і конденсат	0,5	1,1	2,4	3,0	3,2	3,6	3,6	3,55	3,1	2,0
Природний газ	0,2	0,4	0,9	1,28	–	2,2	2,4	2,6	2,6	1,7
АЕС	–	–	–	0,167	0,4	1,0	1,5	2,35	3,0	6,2
ГЕС	0,03	0,06	0,11	0,41	0,6	0,7	1,0	1,2	1,2	1,3
Відновлювані джерела	0,25	0,25	0,3	0,5	0,8	1,0	1,4	2,2	2,9	7,5
Усього	2,08	3,31	5,36	7,38	9,2	11,7	13,7	16,25	17,41	25,2

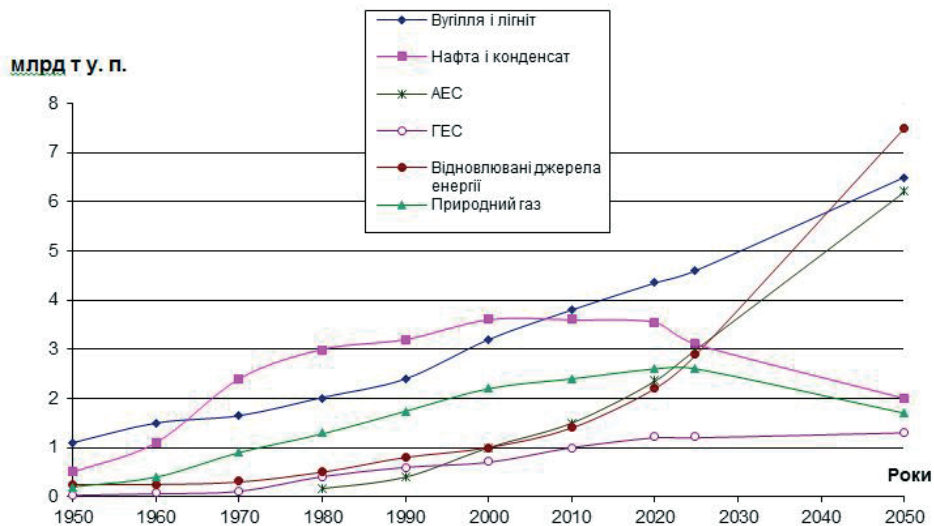


Рис. 1. Світове виробництво енергоресурсів і прогноз у 1950–2050 рр.

Враховуючи наведену вище статистику та прогнози, у найближчі роки слід очікувати збільшення споживання традиційних джерел енергії, особливо для потреб транспорту та одержання хімічної продукції, а відтак зростання споживання технологічно найвигіднішої і донедавна дешевої сировини – нафти. Упродовж 1930–1940 рр. відбувався перехід хімічної промисловості – виробництво полімерів, синтетичного каучуку, волокон, добрив, а також частково металургії з вугільної сировини на нафту і газ. 1975 р. вже 75 % енергії, що споживалася в США, було одержано завдяки використанню нафти і газу. 1980 р. щоденне споживання енергії в США та Канаді становило в перерахунку на нафту приблизно 40 барелів на 1 людину.

Зростання споживання нафти і вичерпання її запасів призводять до стрімкого зростання цін на неї. У 70-х роках ХХ ст. середня ціна бареля нафти країн ОПЕК становила 12,7 \$, на початку ХХІ ст. ціна виросла до 140 \$ за барель, одночасно збільшувалися і ціни на природний газ. На сьогодні ціна на нафту становить близько 70 \$ за барель.

Враховуючи збільшення споживання первинних енергоресурсів (нафти, газу і вугілля) щороку на 3–4 %, які забезпечують приблизно 80 % енергетичних потреб у світі, їх вистачить ненадовго (Мисак та ін., 2005). Зауважимо, що при видобуванні викопних енергоресурсів залежно від геолого-технологічних та економічних умов спостерігається різний відсоток їхнього вилучення. Для нафти це переважно 25–30 %, газу – 30–35 %, вугілля – 20–25 %. Те, що на сьогодні залишається в надрах, є некондиційним у геологічному, технологічному та економічному сенсі і відповідно до розвитку науки і технологій видобування та перероблення може бути використано в майбутньому.

Світові запаси вугілля, порівняно з нафтою і газом, є незрівнянно більшими, за прогнозами вони можуть забезпечити потреби людства щонайменше на 200–250 років, а нафти вистачить на 30–40, газу – на 50–60 років (табл. 2).

За песимістичною оцінкою, до 2030 р. у світі буде видобуто майже всі ресурси нафти, а до 2050 р. очікується вичерпання природного газу, водночас запасів вугілля вистачить ще на 100–150 років. За прогнозом Вороновського та ін. (2005) при сучасному рівні споживання енергії у світі викопних палив вистачить: нафти – на 40, природного газу – на 65, а вугілля – на 250 років.

Хоча в різних авторів різняться оцінки світових запасів нафти і газу та часу їхнього ефективного видобування, однак загальним в оцінках є попередження про швидке (кілька десятиліть) їхнє вичерпання (Брик та ін., 2006, 2008).

**Таблиця 2. Світові запаси викопного палива, млрд т у. п. (Вороновський та ін., 2005)**

Вид палива	Доведені	Прогнозовані	Економічно доцільні
Нафта і конденсат	127–161	289–319	101–114
Нафта сланцева	28–66	450–720	16
Нафта бітумних порід	58–127	167–450	4–30
Газ природний	90–108	220–280	80
Усього вуглеводнів	303–462	1 126–1 769	201–240
Вугілля	660–1 410	4 840–8 590	640–687
Усього	963–1 872	5 966–10 359	841–917

З огляду на ці процеси перероблення вугілля, особливо некондиційного, низькоякісного, в енергетичні гази, синтетичне пальне та хімічну сировину набуває вагомого значення. За термінологією К. Уилсона (1985), вугілля – це «міст у майбутнє» світової цивілізації. Однак коли вугілля активно використовується в тепловій та електричній енергетиці, то його застосування в побуті, а особливо на транспорті, незручне або взагалі неможливе, а в хімічній технології – утруднене й економічно менш вигідне. Крім того, не варто забувати про значні проблеми вугільної промисловості, пов'язані зі зростанням шахтного видобутку вугілля, його збагаченням, перевезенням, а також про екологічно шкідливі сполуки (оксиди сірки й азоту), які утворюються при спалюванні вугілля, та інші екологічні ризики для довкілля.

Отже, викопне тверде вуглецевмісне паливо зберігає визначальну частку у світовій економіці, а його видобування та використання потребує екологічної модернізації.

*Структура та споживання енергетичних ресурсів в Україні.* Україна належить до енергодефіцитних країн, оскільки покриває свої потреби в паливі та енергії із власних джерел лише на 53 %. Імпорт нафти, нафтопродуктів і газу становить приблизно 80 % (Міністерство енергетики України, 2019; Семенов, 2007). Власний видобуток палив становить у середньому на рік: нафти ~ 3 млн т, газу ~ 20 млрд м<sup>3</sup>, вугілля ~ 30 млн т. В Україні 2019 р. 32 % спожитої первинної енергії припадало на вугілля (Міністерство енергетики України, 2019; *Statistical review of world energy*, 2020).

Україна має значні запаси (до 40 млрд т) некондиційного вугілля в малопотужних та високозольних пластах, покладах «соленого» вугілля, вуглецевмісних відпадах тощо, які в перспективі при створенні відповідних екологічно безпечних технологій видобування та використання доцільно включити до загального балансу енергетичної сировини країни (Куровець та ін., 2014; Рудько, 2014).

Енергетичною стратегією України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р окреслено стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України на період до 2035 року, серед яких пріоритетним завданням визначено розширення мінерально-сировинної бази з метою нарощування видобутку вуглеводнів для забезпечення енергетичної незалежності держави, збільшення виробництва енергії із поновлювальних джерел та підвищення енергоефективності господарського комплексу країни.

Найкращою сировиною для хімічної промисловості є газоподібні та рідкі вуглеводні. Завдяки хімічній активності та транспортабельності значення вуглеводневих ресурсів буде зростати. Процеси отримання з вугілля (кондиційного і некондиційного) рідкого або газоподібного палива та хімічних продуктів привертають все більшу увагу, оскільки при дотриманні високих стандартів екологічної безпеки можуть покращити забезпечення енергоносіями та сировиною транспорт, побут та промисловість.

Запаси вугілля України дозволяють повністю задовільнити потреби держави у твердому паливі. Вугілля України представлене всією гамою марок, літотипів – від бурого і кам'яного до високометаморфізованих антрацитів.

Основні запаси кам'яного вугілля зосереджені в Донецькому і Львівсько-Волинському басейнах, а також у Дніпровсько-Донецькій западині, а бурого – у Дніпровському басейні. Загальний обсяг доведених запасів в Україні на кінець 2019 року становив понад 34 млрд т (3,2 % світових). За даними Міністерства енергетики України, видобуток вугілля в Україні 2019 р. склав 31,22 млн т, з яких 6,32 млн т коксівного, 24,9 млн т енергетичного. За 2019 р. вугледобувними підприємствами України видобуто вугілля на 2 062,0 тис. т (або на -6,2 %) менше порівняно з 2018 р., у тому числі видобуток енергетичного вугілля зменшився на 2 575,9 тис. т (або на -9,4 %), коксівного вугілля – збільшився на 513,9 тис. т (або на 8,8 %) (Міністерство енергетики України, 2019).

В Україні 2019 р. лише 53 % споживання вугілля забезпечувалося вугіллям власного видобутку (рис. 2).

Основний вугледобувний район України розташований на території Луганської, Донецької, Дніпропетровської та Харківської областей, займає площу близько 50 тис. км<sup>2</sup>. Ресурси кам'яного вугілля в басейні становлять 101,9 млрд т (93 % ресурсів кам'яного вугілля України), із них балансові запаси – 52,09 млрд т (92,3 % таких запасів по Україні). За даними (Забигайло & Храпкин, 1989; Янко & Трошенкин, 2010), середня глибина розроблення пластів 720 м, а максимальна – 1 400 м. Більшість вугільних пластів, які розробляються, мають потужність приблизно 1 м.

Львівсько-Волинський басейн розташований у межах Львівської та Волинської областей. Загальна площа басейну – майже 10 тис. км<sup>2</sup>, площа з промисловими запасами – 2 тис. км<sup>2</sup>. Ресурси кам'яного вугілля басейну становлять ~2,7 млрд т (2,6 % від ресурсів кам'яного вугілля в Україні), з яких балансових – 1,85 млрд т, а 0,8 млрд т належить до забалансових. Його запаси підраховані в межах глибин 330–700 м. Видобування ведеться на глибинах 330–550 м, у середньому по басейну – 440 м. У вугленосній товщі басейну виявлено 70–80 пластів і пропластків вугілля, переважна більшість яких належить до категорії тонких і некондиційних (Іванців та ін., 1999).

«Солоне» вугілля відрізняється підвищеним вмістом іонів натрію і хлору. Критерієм засоленості прийнято вважати вміст хлору та оксиду натрію понад 0,5 % на суху масу вугілля (Іванова & Кривега, 1985). Запаси «солоного» вугілля в Україні становлять приблизно 11 млрд т і зосереджені в покладах

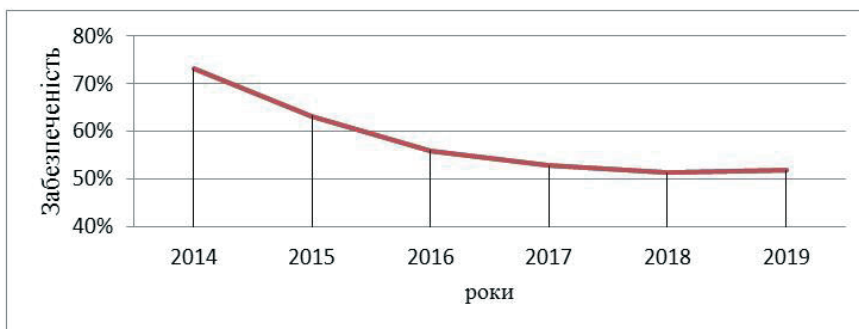


Рис. 2. Динаміка забезпеченості споживання в Україні вугіллям власного видобуття, %

Донбасу (Білецький, 2003; Иванова & Кривега, 1985), де вугілля з підвищеним вмістом водорозчинних лужних компонентів і хлору розвідане на родовищах Західного Донбасу та в Старобельському районі Північного Донбасу (Богданівське, Петриківське і Старобельське родовища) (Иванова & Зайцева, 1982; Пожидаев и др., 1981; Шендрик и др., 1986).

Загалом забалансові запаси некондиційного вугілля в Україні становлять від 17,4 до 40 млрд т (з них біля 11 млрд т – «солоне» вугілля), у т. ч. у Львівсько-Волинському басейні – 0,8 млрд т, які на сьогодні не використовуються. Водночас прогнозні ресурси вуглеводнів в Україні (нафти – 1,0 млрд т, газу – 5,6 трлн м<sup>3</sup>) є незначними порівняно з потребами (Иванців та ін., 2001).

Отже, у перспективі Україна може забезпечувати свої потреби в паливі і хімічній сировині переважно завдяки запасам вугілля, зокрема некондиційного.

*Шахтний газ-метан.* У вугільних пластах і вмісних породах вугільних басейнів України міститься значна кількість горючого метану, який суттєво погіршує безпеку гірничих робіт у шахтах, а при попаданні в атмосферу забруднює навколишнє середовище. Метан у 24 рази активніше впливає на зменшення товщини озонового шару, ніж аналогічна кількість діоксиду вуглецю. Водночас метан вугленосних покладів можна і необхідно використовувати як паливо.

На думку фахівців, сумарні ресурси метану вугленосної товщі Донбасу і Львівсько-Волинського басейну становлять від 13,0 до близько 25,1 трлн м<sup>3</sup> (Рудько, 2014; *Стан та перспективи видобутку та використання метану вугільних родовищ України*, 2014). Реальні, придатні до вилучення його запаси у вугленосних відкладах Донецького та Львівсько-Волинського басейнів становлять 3,0–3,5 трлн м<sup>3</sup>.

Деякі автори стверджують, що загалом ресурси метану вугільних родовищ можуть становити в Україні понад 300 трлн м<sup>3</sup>, зокрема у Львівсько-Волинському басейні – 24 трлн м<sup>3</sup> (Иванців та ін., 1999; Михайлов та ін., 2013; Узіюк та ін., 2001). В одній тонні вугілля в пласті може міститися близько 25 м<sup>3</sup> метану, а виділення метану на деяких шахтах досягає десятків тис. м<sup>3</sup> на добу (Иванців та ін., 2001; Узіюк та ін., 2001).

Шахтний метан як корисна копалина використовується понад 40 років. На метан вугільних родовищ, як самостійну корисну копалину, у світі звернули увагу після енергетичної кризи 1973 р. У США ці роботи заохочувалися шляхом знижок у податках і кредитах. За даними Агенції з охорони довкілля США, 1998 р. із вугільних пластів великої потужності з метаносністю від 8,5 до 19,2 м<sup>3</sup>/т добуто й утилізовано приблизно 10 млрд м<sup>3</sup> метану, що майже у 12 разів більше, ніж 1997 р. У США експлуатується понад 5 000 свердловин, що добувають газ із вугільних пластів. Очікується, що в найближчі роки видобуток метану з вугільних родовищ становитиме приблизно 80 млрд м<sup>3</sup> (Михайлов та ін., 2013).

Свердловинні методи дегазації (видалення метану) широко застосовуються також в Німеччині (ресурси 3–4 трлн м<sup>3</sup>), Англії (1,9–2,8 трлн м<sup>3</sup>), Австралії (6,0 трлн м<sup>3</sup>) та інших країнах. У Польщі (ресурси 1,6–2,0 трлн м<sup>3</sup>), Чехії (1,1–1,5 трлн м<sup>3</sup>), Китаї (25–30 трлн м<sup>3</sup>) широко ведуться роботи з використання метану як у процесі видобування вугілля в шахтах, так і на розвіданих



вугільних родовищах. В Україні річний видобуток метану вугільних родовищ може сягнути 6–8 млрд м<sup>3</sup>.

*Вуглецевмісні сланці України.* Окрім вугілля, як потенційне джерело вуглецевмісної сировини також можна розглядати карпатські менілітові сланці (КМС) та Болтиські горючі сланці.

Загальні геологічні запаси КМС на площі майже 57 тис. км<sup>2</sup> (до глибини 200 м) оцінюються в понад 500 млрд т (Порфір'єв та ін., 1963). За середнього вмісту в них горючих компонентів 12 % мас. (Ковальчук, 1985; Рудько, 2014), сумарна кількість палива (вуглецевмісної органічної компоненти) становить орієнтовно 50–60 млрд т. Здавалося б, це величезний ресурс, але їхнє використання є проблемним через низьку теплоту згорання (у середньому – усього 4,2–4,3 МДж/кг), високу зольність (понад 85 %) та вологість. Тепловий баланс при спалюванні цих сланців приблизно такий: витрати тепла на нагрівання золи до 850–900 °С становлять 1900 кДж/кг, втрати тепла з димгазами – 220 кДж/кг, корисне тепло – близько 2300 кДж/кг, що в 11–13 разів менше, ніж тепловиділення від згорання 1 кг кам'яного вугілля.

З огляду на дефіцит традиційних видів палива в Україні, виникла пропозиція використовувати КМС як резервне енергетичне викопне паливо. Якби вдалося без великих затрат і шкоди для екології Карпат добути хоча б 15–20 % геологічних запасів органічної сировини, розсіяної в цих сланцях, це дало б змогу забезпечити енергетику України значними обсягами додаткового палива.

Болтиське родовище горючих сланців розташоване в північній частині Кіровоградської області. Прогнозні ресурси цих сланців за мінімальної теплоти згорання 8,4 МДж/кг сягають 38 млрд т. Їхні основні характеристики: зольність – 63–68 %, робоча вологість – 3,2–3,4 %, вихід смол – 12–15 %, вміст сірки – 1,5–1,6 %, густина – 1,3 т/м<sup>3</sup>. Елементний склад горючого сланцю, %: С – 83,46; Н – 11,43; N – 0,89; S – 1,11; O – 3,11; C/H – 7,30. При термічному розкладанні сланцю вихід газу становить 750 м<sup>3</sup>/т.

*Альтернативні та відновлювані джерела енергії.* В умовах енергетичної кризи у світі загалом і в Україні зокрема, великого значення набувають нетрадиційні (альтернативні) та відновлювані джерела енергії (НВДЕ), до яких належать вітрова енергетика, енергія сонця, біогаз, енергія води, геотермальна енергія, біомаса та ін.

Загальний потенціал ресурсів відновлюваної енергії в Україні становить приблизно 2210 млрд кВт·год на рік, зокрема, млрд кВт·год на рік: геотермальна енергія – 1400, біомаса – 610, енергія сонця – 130, вітрова енергія – 65, мала гідроенергетика – 6, тим часом як потенціал великої гідроенергетики (15 млрд кВт·год на рік) майже вичерпаний (Владимиров, 2001). Проте використання нетрадиційних джерел енергії має низку недоліків. Так, уже освоєна атомна енергетика базується на обмежених запасах урану, ціна якого постійно зростає. Не варто забувати і про техногенні ризики та проблему захоронення радіоактивних відходів.

Будівництво гідроелектростанцій чи установок, що використовують енергію вітру, океанських припливів-відпливів або геотермальну енергію, залежить від географічного розташування регіонів і тому може мати лише обмежене застосування. Такі установки пов'язані переважно із втратами значних

площ земель (Дніпровський каскад), а сонячні батареї характеризуються на сьогодні відносно низькою ефективністю і можуть застосовуватися за відповідного клімату та значних витрат дорогих матеріалів.

**Способи термохімічного перероблення некондиційної вуглецевмісної сировини.** Способи використання вугілля як тема дослідження є надзвичайно багатогранною і об'ємною як в історичному плані, так і в розрізі методів, технологій, технічних рішень, що застосовують у промисловості зараз.

Ця робота не має на меті проведення детального аналізу способів використання низькоякісного вугілля, а лише висвітлення їхніх загальних характеристик на рівні, достатньому для зіставлення за визначальними ознаками. Основна ознака – це спрямованість процесів, зокрема на отримання енергії (шляхом прямого спалювання), хімічних продуктів і термохімічне перероблення з отриманням цільових газів та рідких вуглеводневих продуктів.

Розглянемо способи термохімічного перероблення некондиційної твердої вуглецевмісної сировини (горючих копалин), а саме некондиційного низькоякісного вугілля, при яких отримують гази та рідкі вуглеводневі продукти для певного використання.

Уперше газ із вугілля був використаний для освітлення будинків та міських вулиць в Англії ще у XVIII ст., а відтак ця технологія поширилася на країни Європи і США.

Отримання синтетичного газу із вугілля розвивається головним чином за трьома напрямками, які реалізовані в промисловому масштабі.

На сьогодні *одним з основних* способів є суха перегонка або піроліз та коксування вугілля без доступу кисню – напрям, при якому виділяються легкі компоненти та відбувається крекінг легких вуглеводнів. Великі об'єми газу отримують у доменному процесі (*другий напрям*), коли при взаємодії руди та коксу в присутності повітря утворюється оксид вуглецю, що використовується як компонент палива. Проте низька калорійність цього газу виключає можливість транспортування на великі віддалі і зумовлює його локальне використання. *Третій напрям* – це цілеспрямована пряма газифікація вугілля та вуглецевмісних твердих горючих копалин, зокрема низькоякісних горючих сланців, відходів вуглевидобутку тощо – процес, який використовують лише, щоб отримати газ для його подальшого застосування в енергетичній та хімічній промисловості. Цей напрям газифікації стає перспективним у зв'язку з різким та непрогнозованим зростанням цін на нафтову сировину та природний газ.

Якщо в 50–60-ті рр. минулого століття газифікація вугілля втратила своє значення (у зв'язку з освоєнням нових родовищ нафти і газу та, відповідно, падінням цін на них), то на теперішньому етапі розвитку промисловості та видобутку природних ресурсів відбувається переосмислення ролі вугілля (особливо це актуально для України, у якій вугілля, враховуючи його гарантовані запаси та темпи видобування, є чи не єдиною й основною корисною копалиною ще на довшу перспективу). Тому роль екологічно безпечної газифікації вугілля (некондиційної твердої вуглецевмісної сировини), особливо некондиційного, низькоякісного, з часом буде лише зростати.

Подібна ситуація спостерігається, наприклад, у США, Німеччині, ПАР, Австралії та інших багатих на вугілля країнах, де великі фірми упродовж



тривалого часу проводять високовартісні комплексні дослідження в галузі отримання газу з вугілля, яке в перспективі може замінити природний газ. Цей напрям робіт стає перспективним ще й через тривалий ріст цін на нафтову сировину. Зусилля іноземних фірм спрямовані в основному на розвиток таких процесів, як виробництво синтез-газу ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), відновлюваного газу з високим вмістом  $\text{H}_2$ , а також для виробництва дешевого енергетичного газу ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) із дотриманням вимог до охорони довкілля. Ефективність порівнюваних варіантів газифікації буде визначатися вартістю цільової продукції.

Обґрунтування відбору кращих методів газифікації вимагає врахування таких аспектів:

- можливість використання різних видів палива (вуглецевмісних твердих горючих копалин);
- вирішення проблеми захисту навколишнього середовища;
- забезпечення прийнятної вартості продуктів перероблення;
- узгодження технічних вимог та характеристик, що висуваються промисловістю до газогенераторів;
- можливість реалізації та технічний рівень рішень, що приймаються.

При виборі та аналізі нових схем газогенераторів теоретично неможливо з достатньою точністю відповісти на всі питання. Відповіді на них можна буде отримати тільки після виконання технічних проєктів та проведення комплексної дослідно-експериментальної апробації способів газифікації.

*Піроліз та коксування.* До початку ХХ ст. піролізом і коксуванням кам'яного вугілля отримували більшість хімічних продуктів. Ці процеси базуються на нагріванні вугілля без доступу кисню (Фальбе, 1980). Піроліз здійснюють за різних температур залежно від призначення кінцевих продуктів: низькотемпературний піроліз (або напівкоксування) проводять за температур 500–600 °С, високотемпературний (або коксування) – за 900–1 100 °С. Сучасні процеси напівкоксування бурого вугілля зорієнтовані переважно на отримання синтетичного рідкого палива та напівкоксу. При подальшій гідрогенізації смоли піролізу можливе отримання моторного палива. Усього в процесі коксування виробляють приблизно 250 хімічних продуктів. Напівкокс піролізу використовують переважно як енергетичну складову для брикетування та в металургії.

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

У різних країнах зараз працює понад 80 дослідних установок прямої гідрогенізації вугілля, проте в промисловому масштабі такі технології ще не використовуються. Основні недоліки сучасних технологій пояснюються низькою продуктивністю процесу, використанням водню високого тиску, необхідністю регенерації каталізаторів для повторного використання тощо. Частина цих проблем може бути усунена шляхом вибору та застосування дешевих залізовмісних каталізаторів на основі гірничих матеріалів (пірит, піротит, магнетит), а також гірничих концентратів та шламів (Брик, 2015).

*Газифікація.* При високотемпературному обробленні твердого палива його органічні складники перетворюються в газоподібні та рідкі продукти. Перші процеси газифікації ґрунтувалися на термічному розкладі вугілля (в автоклавах) з отриманням висококалорійного світільного газу та коксу. Потім був запропонований спосіб отримання «водяного газу» з коксу. На початку 1900-х років у США спостерігалось значне зацікавлення у використанні генераторного газу в газових двигунах. На початку століття в країні працювало вже близько 500 подібних установок, у яких використовували антрацит, завдяки чому уникали виділення смоли.

Перші газогенератори були періодичної дії. Вибір конкретного типу реактора (найбільш відповідальне завдання при проектуванні процесу) залежить від багатьох чинників, зокрема від способу використання кінцевого продукту, хімічних і фізичних властивостей вугілля, потрібної продуктивності газогенератора та методики утилізації побічних продуктів.

Основні ознаки, за якими розрізняють типи реакторів, за Г.-Д. Шиллінгом (Шиллинг и др., 1976):

1. Спосіб здійснення контакту палива з окиснювачем у робочій зоні: у нерухомому шарі вугілля, у киплячому або псевдокиплячому шарі, в об'ємі з пилоподібним паливом, в обертових реакторах чи реакторах із вільним падінням вугілля тощо.

2. Характер дуття: повітряне, пароповітряне, парокисневе.

3. Величина робочого тиску.

4. Число ступенів хімічного реагування.

5. Спосіб видалення золи: рідке шлаковидалення, сухе шлаковидалення, агломерація, а також за процесом із застосуванням проміжних твердих або рідких теплоносіїв, сорбентів тощо.

До газогенераторів різних типів висувають такі вимоги:

– висока інтенсивність процесів, що дозволяє створювати апарати великої одиничної потужності;

– здатність працювати за тисків до 3,5 МПа та вище;

– достатня гнучкість, щоб газогенератор допускав зміну навантаження протягом доби і щоб ця операція не призводила до порушення режимів роботи;

– повнота використання паливних ресурсів. Процеси не повинні давати значної кількості органічних відходів (смол, сажі, коксу тощо);

– безвідходність технології;

– мінімальний вихід токсичних відходів, знезараження яких робить процес значно дорожчим;

– простота технології, що забезпечує можливість зменшити капітальні та поточні витрати та підвищує надійність.

При виборі того чи іншого процесу газифікації одним із основних показників є ефективність використання палива. Проте процес з найвищим коефіцієнтом корисної дії (ККД) деколи може бути не найвигіднішим, до прикладу, унаслідок погіршення технологічності та вартості процесу. Основні втрати, які визначають ККД газогенератора, – це відсоток залишку органічної речовини у шлаці, втрати тепла в навколишнє середовище через стінки реактора, гідравлічні втрати по газоповітряному тракту, а також витрати електроенергії на привід додаткових агрегатів.

Відомо, що теплота згорання газу, одержуваного при використанні повітряного дуття, становить 3,8–6,7 МДж/м<sup>3</sup> (газ із низькою теплою згорання), а при використанні кисневого дуття – у межах 9,0–18,8 МДж/м<sup>3</sup>. Газ із високою теплою згорання (31–37 МДж/м<sup>3</sup>) отримують методом піролізу або при використанні складних та дорогих вторинних процесів каталізу та метанування. У табл. 3 наведено помислові процеси газифікації твердих палив (вугілля, сланців) (Майстренко и др., 1998).

Однак, незважаючи на велику кількість досліджень, значних успіхів у галузі термохімічного перероблення та конверсії низькоякісного твердого палива для ефективного використання на сьогодні ще не досягнуто. Крім того, наземне перероблення низькоякісного вугілля і сланців не є безвідходною технологією, не вирішує повною мірою проблему утилізації твердих залишків газифікації.

*Газифікація твердого палива та відходів вуглезбагачення.* Відходи видобування та збагачення вугілля з підвищеним вмістом вуглецю ( $C_{\text{орг}} > 25\%$ ) можна розглядати як некондиційне низькоякісне високозольне паливо, яке доцільно направляти або на додаткове збагачення, або безпосередньо на газифікацію. Відокремлення вугілля з породної маси – трудомісткий процес, тому зараз пропонують проводити роботи з наземного перероблення вугілля без попередньої його підготовки. Труднощі технологічного використання відходів вугільної промисловості виникають насамперед у зв'язку з хіміко-технологічними властивостями вугілля. Неоднорідність такого палива за агрегатним станом, фракційним складом та вмістом горючих компонентів зумовлює необхідність створення не універсальних, а різних типів наземних установок – газогенераторів, що гальмує їхнє широке впровадження.

Т а б л и ц я 3. Промислові процеси газифікації вугілля та сланців

Назва процесу	Робочий тиск	Окиснювач	Організація робочого процесу	Продуктивність, т/доба
Лургі	надлишковий	кисень і повітря	стаціонарний шар	765
			на пілоподібному паливі	720
Копперс-Тотцека	атмосферний	кисень і повітря	киплячий шар	755
Вінклера	атмосферний	повітря, кисень, пара	стаціонарний шар із шлакуванням	84
Моргана	атмосферний	повітря	на пілоподібному паливі	700
Руммеля	атмосферний	кисень	стаціонарний шар	24
Бабкок-Вілкокса	атмосферний	повітря	стаціонарний шар	145
М. В. Келлога	атмосферний	повітря і кисень	стаціонарний шар	500
Газифікація сланців (Естонія)	атмосферний	повітря	стаціонарний шар	132
Тексако	надлишковий	кисень і повітря	водно-вугільна суспензія	150
				879

У світі діяло близько 370 промислових газових станцій із стаціонарною пошаровою газифікацією кускового твердого палива (метод Лургі), 24 газові станції, які працюють за методом Вінклера, та понад 20 станцій із газогенераторами Копперс-Тотцека, однак ці технології малоприменні для утилізації відпадів вуглевидобування та вуглезбагачення.

При газифікації в реакторі фірми Лургі (Фальбе, 1980; Шиллинг и др., 1976) можна використовувати вугілля вологістю до 25 % та зольністю до 30 %. Перша установка була запущена в експлуатацію в Німеччині 1938 р. Суттєвим недоліком процесу Лургі є неможливість використання в процесі газифікації вугільних дрібних частинок (менших за фракцію 3 мм) та пилу, оскільки для досягнення потрібної газопроникності вугільного шару в газогенератор потрібно подавати тверде паливо фракцією не менш ніж 3–8 мм. Процес Лургі в чистому вигляді для газифікації низькоякісного вугілля, а тим більше вуглевідпадів, є малоприменним.

Процес Копперс-Тотцека на сьогодні є чи не єдиним способом, що дозволяє застосовувати для газифікації пилоподібне паливо (Фальбе, 1980; Шиллинг и др., 1976). У цьому процесі отримують газ у середньому з теплою згорання близько 11 МДж/м<sup>3</sup>. Він розроблений у Німеччині (м. Ессен) компанією «Н-Копперс», а перша така установка була здана в експлуатацію у Фінляндії 1952 р. Однак жорсткі вимоги до вихідної сировини (ступенів подрібненості сировини, потреба в підсушці та труднощі зі шлаковидаленням) роблять цей спосіб економічно недоцільним для газифікації низькоякісного вугілля.

Для газифікації низькоякісного вугілля найдоцільніше застосовувати газогенератори системи ВІНКЛЕРА, у яких переробляють вуглецевмісне тверде паливо з розміром вугільних частинок не більш ніж 10 мм та вологістю до 8 %. Технологія розроблена компанією «Деві Пауер», і перша промислова установка була впроваджена 1926 р. у Німеччині. Однак для процесу Вінклера характерні високі втрати палива через те, що разом з газом виносяться тонкі фракції вугілля. Крім того, у таких газогенераторах не можна використовувати вугілля, здатне до спікання (без попередньої термічної підготовки) (Фальбе, 1980; Шиллинг и др., 1976).

У минулі десятиріччя на основі розглянутих вище класичних способів газифікації було розроблено чимало модифікованих газогенераторів. У літературі (Майстренко и др., 1998) описано газогенератори третього покоління, які поки що в промисловості не застосовують. До прикладу, метод газифікації твердого палива у псевдокиплячому шарі під тиском пройшов апробацію на установці з продуктивністю 1 000 м<sup>3</sup>/год, і процес піролізу твердого палива при його швидкісному нагріві твердим теплоносієм, що дозволяв отримувати вугільну смолу, ще в очікуванні своєї реалізації.

Технологія комплексного перероблення вугілля може мати господарське значення і для України, оскільки для цього підходить і буре вугілля. Варто зауважити, що використання цього способу може бути доцільним при утилізації низькоякісних (високозольних) сапропелітів Львівсько-Волинського басейну (зольність 46–54 %) (Брик & Стефаник, 2010; Брик та ін., 2014, 2019).

На сьогодні для газифікації вугілля, зокрема низькоякісного, розроблені новітні технології, які перебувають на різних стадіях напрацювання на

пілотних та демонстраційних установках. Такі процеси, як ХАЙ-ГЕЗ, CO<sub>2</sub>-акцептор, БАЙ-ГЕЗ та інші, полягають у газифікації пилоподібного палива під тиском (також у киплячому шарі) та дозволяють підвищити теплоту згорання цільового газу за рахунок збільшення виходу метану. Ці методи використовують вугілля будь-яких марок для синтезу газів, у яких відсутні смоли та інші шкідливі речовини.

Технологічні рішення для перероблення низькоякісного вугілля та/або вуглевідпадів з метою одержання енергетичного газу можна умовно розділити на дві групи/напрями.

До першої групи належать способи та установки, які використовують для перероблення твердого палива у вигляді водно-вугільних суспензій, шламів. До другої групи – установки газифікації зневодненого (підсушеного) низькоякісного вугілля. Перший напрям є перспективним при утилізації значних об'ємів високообводнених шламів, які накопичуються при гідромеханічному видобуванні та транспортуванні вугілля, а також на великих вуглезбагачувальних фабриках мокрого збагачення вугільної гірничої маси. Для утилізації цих обводнених вуглевідходів доцільно використовувати способи, у яких водно-вугільну суспензію подають насосами високого тиску в реактори, де за температури 900–1100 °С та високих тисків відбувається взаємодія розжареного вуглецю з водою з отриманням висококалорійного газу. За способом термічного перероблення під тиском вуглецевмісних відходів у шахтних печах можливе отримання енергетичного газу з теплотою згорання до 8 МДж/м<sup>3</sup>.

Майже для всіх розроблених наземних методів газифікації в їхньому сучасному оформленні характерними є низька теплотворна здатність виробленого газу, недостатня продуктивність газогенераторів, значні капітальні витрати на їхнє облаштування та негативний вплив на довкілля. Крім того, наземна переробка низькоякісного вугілля не є безвідходною технологією і не вирішує проблеми повторної утилізації «вторинних» твердих залишків газифікації.

Отже, на сьогодні освоєні різні модифікації промислових процесів газифікації вугілля, найбільш поширеними з яких є технології Лургі (стаціонарний шар кускового вугілля), Вінклера (киплячий шар вугільних частинок), Копперс-Тотцека (пиловугільний потік), Тексако (водно-вугільна суспензія) та їхні розмаїті модифікації. На дослідно-промисловому рівні відпрацьовуються приблизно двадцять технологій нового покоління газифікації вугілля, серед яких можна назвати як перспективні процес Ексон – каталітична газифікація вугілля водяною парою в киплячому шарі, процес Молтен Солт – парокиснева газифікація за підвищеного тиску в розплаві соди, процес Патгаз – газифікація за атмосферного тиску в розплаві заліза.

Ефективність процесів газифікації може суттєво підвищуватися при використанні відповідних каталізаторів, які дозволяють зменшувати температуру процесу при збереженні високої швидкості реакцій, а також регулювати склад продуктів. Каталізатор дає можливість як пришвидшувати реакції прямого перетворення вуглецю в газові з'єднання, так і сповільнювати газо-фазові реакції розпаду отриманих продуктів. Найбільш поширеними каталізаторами процесу газифікації вугілля є з'єднання лужних, лужноземельних та деяких перехідних (Ni, Fe, Co) металів.



У промисловому масштабі на основі синтез-газу, отриманого з вугільної сировини, діють виробництва таких продуктів: метанолу, рідких аліфатичних вуглеводнів та метану. Технології синтезу рідких вуглеводнів з СО та Н<sub>2</sub> пройшли промислову перевірку у двох варіантах, відомих як процес Фішера–Тропша та процес Мобіл, і можуть використовуватися при розробленні сучасних способів для екологічно безпечного перероблення (конверсії) низькоякісного вугілля.

*Підземна газифікація некондиційних вугільних покладів.* В останні десятиріччя у світі розвивається перероблення некондиційної вуглецевмісної сировини в підземних умовах геотехнологічними способами (Стефанік, 1990), при яких видобуток та утилізацію корисних компонентів з некондиційного твердого палива здійснюють або способом підземної газифікації вугілля (ПГВ) на місці природного залягання (“in situ”), або на поверхні на місці складування твердих відходів вуглевидобутку. Прикладом такого способу може бути технологія підземного спалювання вугільних блоків (целіків) відпрацьованих шахт (Брик та ін., 2013), яка передбачає отримання горючого газу та теплоносія у вигляді пари для наступного генерування електроенергії в наземних електростанціях, облаштованих поруч із покладами вугілля.

ПГВ є доцільним способом розроблення тих вугільних родовищ, які є непридатними до видобутку із застосуванням традиційної технології через низьку теплоту згорання вугілля, невелику потужність пласта, високу зольність і підвищену вологість вугілля, значну глибину залягання, великий кут падіння пласта тощо. Із 80-х років минулого століття в США, країнах Західної Європи, а також Китаї, Індії, Австралії та інших знову виріс інтерес до ПГВ (Крейнин & Зоря, 2009). Нині ця технологія успішно реалізується в Китаї, де працює 10 станцій підземної газифікації вугілля. Зауважимо, що в Україні приблизно 40 млрд т прогнозних запасів некондиційних вугільних пластів придатні до ПГВ (Фальштинський та ін., 2010).

*Особливості газифікації «солоного» вугілля.* Використання «солоного» вугілля для енергетичних цілей неможливе з огляду на те, що при його спалюванні відбувається шлакування парових котлів леткими хлоридами, а також руйнування металевих частин установки і теплоізоляційних карборундових матеріалів у зв'язку з високою корозійною активністю галогеновмісних солей. Хлористий натрій призводить до зниження температури шлакування за 750–850 °С (Білецький, 2003), що є значно нижче від температури шлакування самого вугілля (1 050–1 100 °С).

Численними дослідженнями із використання «солоного» вугілля в промисловості встановлено, що раціонального способу наземного перероблення цього вугілля на сьогодні не існує.

Спроби використання «солоного» вугілля передбачають його перероблення в процесі попередньої газифікації, знесолення шляхом промивання водою, сумісне спалювання з більш «чистим» паливом, переведення шкідливих домішок в тугоплавкі сполуки при введенні присадок магнію і калію.

Разом з тим родовища «солоного» вугілля в Україні є придатними для підземної газифікації. Гірничо-геологічні умови, висока теплота згорання (приблизно 28 МДж/кг), невисока зольність (приблизно 10 %) сприяють проведенню процесу газифікації на місці залягання «солоного» вугілля. При цьому



зашлакування «підземного генератора» хоч дещо і погіршує теплообмін та умови проведення процесу, але в кінцевому результаті, на відміну від наземного генератора, не призводить до виходу його з ладу і затухання процесу.

Утім, відомі способи підземної газифікації вугілля мають деякі істотні недоліки, які не дозволяють застосовувати їх для підземної газифікації «солоного» вугілля. Суттєвим недоліком є значна корозійна активність отримуваних газів з високим вмістом HCl, що призводить до швидкого виходу з ладу газовідвідної свердловини. Тому отриманий газ потрібно обов'язково відмивати від парів соляної кислоти.

*Отримання синтетичного рідкого палива з твердого вуглецевмісного горючого палива.* На сьогодні відома низка процесів отримання синтетичного рідкого палива (СРП) з вугілля:

- 1) безпосереднє гідрування вугілля (процес Бергіюса);
- 2) взаємодія вугілля з водяною парою з отриманням суміші CO+H<sub>2</sub> і подальшим перетворенням отриманих газів у рідкі продукти за процесом Фішера–Тропша;
- 3) розчинення вугілля під дією хімічних реагентів (кислот, лугів) або його високотемпературна екстракція активними розчинниками.

*Бергінізація (перший напрям)* – метод переведення вугілля в рідку фазу під дією водню за високих температур і тисків у присутності каталізатора – уперше реалізовано у 20-х роках ХХ ст. в Німеччині фірмою “IGFarbenindustrie” з використанням бурого, а в Англії 1935 р. – із бітумінозного вугілля. Процес проходить за температури 450–500 °С і тисків до 70 МПа у присутності залізного та молібденового каталізаторів. На заводах Німеччини 1941 р. таким методом отримували 4 млн т моторного палива. 1945 року в Німеччині діяло 12 установок гідрування вугілля, на яких виробляли 2 млн т авіабензину на рік, з них шість працювало на бурому чи бітумінозному вугіллі і шість – на смолах коксування або на пеках. Процес безпосереднього гідрування вугілля до 50-х років ХХ ст. та результати проведених пізніше наукових досліджень детально описано в монографії Рапопорта (1950). Але після війни внаслідок появи на ринку дешевої нафти виробництво СРП за методом Бергіюса припинилося.

Щоправда, у період першої нафтової кризи в 70-х роках ХХ ст. знову було проведено низку дослідних робіт у цій галузі і навіть уведено в дію деякі пілотні установки, але метод бергінізації не був відновлений у промисловості через низку недоліків:

- ефективне перероблення можливе лише для деяких сортів вугілля – бурого або бітумінозного, причому бажано сапропелітового, а не гумусового;
- високі вимоги до зольності вугілля – не більш ніж 5 % для кам'яного і 10 % – для бурого вугілля;
- необхідність застосування високоякісних легованих матеріалів для обладнання та наявність у виробництві складних технологічних вузлів;
- технологічна схема ускладнена рісайклінгом утворюваних газів та смол;
- за один цикл перероблення вугілля лише на 50 % перетворюється в рідину за температури кипіння нижче, ніж 400 °С, а щоб отримати бензин, одержаний продукт необхідно повторно гідрувати;
- відносно високі енергетичні затрати;

- відносно високі витрати водню – 0,6–1,6 м<sup>3</sup>/кг вугілля;
- витрата каталізатора, частина якого втрачається зі шламом. Особливо це стосується стадії парофазного гідрування, де каталізатором є не дешевий оксид заліза, а значно дорожча суміш сульфідів вольфраму і цинку;
- одержана складна суміш вуглеводнів зазвичай не відповідає технічним нормам для палива і потребує подальшого перероблення.

*Другою відомою технологією одержання рідких палив з вугілля є отримання з нього суміші CO та H<sub>2</sub> із подальшим їхнім перетворенням у рідкі вуглеводневі сполуки за методом Фішера–Тропша.*

Гідрування синтез-газу CO + H<sub>2</sub> (синтез Фішера–Тропша) було вперше здійснено 1925 р. у Німеччині за атмосферного тиску та температури 250–300 °C з використанням залізо-кобальтового каталізатора (пізніше – оксидів кобальту з домішками оксидів торію та магнію). Згодом виявилось доцільним використання в промислових умовах більш високих тисків – переважно 2,0–3,0 МПа і навіть до 30,0 МПа. У Німеччині 1941 р. працювало 9 таких установок, які 1942 р. виробили 550 тис. т палива. Технології синтезу та одержання СРП із синтез-газу присвячені численні літературні огляди (Брик та ін., 2006; Уилсон, 1985; Фальбе, 1980; Шиллинг и др., 1976).

Особливою перевагою способу є те, що в ньому немає потреби окремого одержання водню із води чи метану – процесів економічно не вигідних. Водень отримується при взаємодії вуглецю з водяною парою за рівнянням  $C + H_2O = CO + H_2$ . Оскільки цей процес є ендотермічним (зміна ентальпії –  $\Delta H$  на 1 моль реагуючих речовин становить 28,7 ккал  $\times$  4,19 = 120,2 МДж), то для утримання оптимального температурного режиму необхідно здійснювати паралельно екзотермічне окиснення частини вугілля киснем до CO<sub>2</sub>. Константа рівноваги процесу взаємодії вугілля з водяною парою із збільшенням температури суттєво зростає, так що за температури 1 000 °C рівновага повністю зсувається праворуч.

Однією з основних проблем процесу є те, що при використанні повітря як джерела кисню в одержаній суміші буде до 50 % азоту. Це призводить до не вигідного, неекономічного використання технологічного об'єму апаратів синтезу і, відповідно, до завищених енергетичних витрат. Цьому можна запобігти, використовуючи не пароповітряне, а парокисневе дуття (або збагачене киснем повітря). Технологічне удосконалення розділення повітря за процесом Лінде здешевило вартість кисню. Отже, доцільність використання кисню або збагаченого киснем повітря вирішуватиметься в кожному конкретному випадку економічним розрахунком.

Зрозуміло, що використання вугілля в енергетиці, порівняно з нафтою чи газом, супроводжується рядом недоліків – передусім його видобуток, особливо з більших глибин, є значно важчим. Крім того, його перевезення є дорожчим, порівняно із транспортуванням нафти чи газу трубопроводами. Тому доцільним є розміщення заводів з виробництва синтетичних рідких палив поблизу місць видобутку вугілля. При спалюванні вугілля утворюється, порівняно з нафтою, значно більше золи та двооксиду сірки, що створює екологічні ризики.

При вирішенні більшості вказаних проблем можна буде досягнути в перспективі конверсії вугілля, у т. ч. і некондиційного, у рідке синтетичне

паливо (Брик та ін., 2006), а відповідно зробити висновок про доцільність його використання.

Підкреслимо, що найбільшою перевагою процесу Фішера–Тропша є те, що для одержання синтез-газу можна використовувати практично всі марки вугілля. Завдяки цьому в процесі може використовуватися суміш CO + H<sub>2</sub>, яка отримана не лише в газогенераторах на поверхні, але й шляхом підземної газифікації вугілля, у т. ч. і з некондиційних родовищ – малопотужних пластів, високозольних чи засолених покладів.

*Третій напрям розвитку* методів отримання СРП полягає у використанні високоактивних розчинників, особливо в надкритичних умовах, що призводить до переведення основної частини вугілля у високомолекулярну смолу, яка надалі легше гідрується. Початково як сировину для одержання СРП частково використовували смоли, отримані під час напівкоксування вугілля, переважно бурого, і навіть сланців. Активними розчинниками, дія яких впливає на деполімеризацію структури вугілля, є, наприклад, фенол та паратолуолсульфо кислота (Брик та ін., 2006).

Перспективним можна також вважати зрідження вугілля в процесі високотемпературного нагрівання під тиском у присутності кислот, лугів та в органічних розчинниках або навіть у воді чи розплавах солей з гідруванням або без нього.

Узагальнюючи, можна сказати, що хоч екстракційні методи зрідження вугілля часто дають значний ступінь його перетворення, вони мають і низку недоліків (втрата каталізаторів, застосування переважно дорогих розчинників, необхідність подальшого розщеплювального гідрування первинно утвореного продукту, екологічні ризики тощо). Більшість пропонує розробок обмежилася лабораторними дослідженнями чи, у кращому випадку, малогабаритними пілотними установками.

*Перероблення вугілля в суміші з відходами полімерів.* Заслужують на увагу процеси отримання СРП шляхом сумісного перероблення відходів полімерів з вугіллям.

В останні десятиліття з'являється все більше досліджень, присвячених розробці методів утилізації відходів полімерних матеріалів (поліетиленових пляшок, відпрацьованих автомобільних шин тощо) з одержанням газового або синтетичного рідкого палива (Макітра та ін., 2013).

Одним із шляхів утилізації полімерів є також їхнє використання в процесах коксування вугілля з метою покращення якості коксу. До бітумінозного вугілля при виробництві металургійного коксу можна додавати до 5 % поліетилену (ПЕ) чи поліпропілену. Оптимальним варіантом утилізації відходів полімерів буде їхній піроліз (із низькосортним некондиційним вугіллям) до енергетичного палива. Особливо багато досліджень присвячено такому переробленню поліолефінів. Це й не дивно, якщо врахувати, що ще наприкінці 90-х років ХХ ст. тільки в США кількість відходів пластику становила понад 20 млн т (у тому – 50 % ПЕ).

Оскільки ПЕ за високих температур може виступати донором водню, доцільнішим слід вважати його сумісний піроліз із вугіллям. Дослідження показали, що збільшення вмісту поліетилену до 60 % в шихті з бурого вугілля призводить до майже 100 % конверсії в процесі його піролізу.

Полістирол при піролізі разом з вугіллям поводить себе подібно до ПЕ, вихід смоли зростає зі збільшенням вмісту полімеру і температури процесу. Явище синергізму і в цьому випадку не спостерігається, мабуть, через менший вміст водню в ароматичних кільцях порівняно з ПЕ.

Альтернативним гідруванню шляхом використання полімерів для одержання СРП є їхня оксидативна газифікація сумісно з вугіллям з отриманням суміші СО та Н<sub>2</sub>, які далі за відомим процесом Фішера–Тропша перетворюються в СРП. У процесі газифікації бажано використовувати каталізатори, переважно солі лужних чи лужноземельних металів або солі заліза. Процес проводять переважно в киплячому шарі.

Отже, важкоутилізовані відходи полімерів, насамперед поліолефіни, після змішування їх з вугіллям чи іншими горючими матеріалами можуть бути перетворені шляхом піролізу в синтетичне рідке паливо чи інші цінні хімічні продукти.

### **Висновки.**

1. Проведений аналіз структури споживання первинних енергетичних ресурсів у світі показав, що упродовж останніх десятиліть частка вугілля стабільно становить 25–30 % і не виявляє тенденції до зменшення. Аналогічні закономірності спостерігаються і в Україні. Встановлено, що в Україні енергетичний потенціал запасів некондиційної вуглецевмісної сировини співрозмірний з покладами кондиційного вугілля і може бути використаний для підвищення енергетичної забезпеченості країни. Водночас погіршення екологічних показників довкілля у світі і в Україні вимагає підвищення рівня екологічної безпеки при використанні вуглецевмісної сировини та відповідної екологічної модернізації способів її термохімічної конверсії.

2. Наведений огляд відомих способів термохімічного перероблення вуглецевмісної сировини (піроліз та коксування, гідрогенізація, газифікація тощо) показав, що процес газифікації, який дозволяє переробляти різноманітні некондиційні паливні ресурси в наземних та підземних умовах, є найбільш перспективним для підвищення рівня екологічної безпеки та екологічної модернізації вугільної галузі країни.

Білецький, В. (2003). Проблеми переробки солоного вугілля. *Праці Наукового товариства імені Шевченка. Хемія і біохімія*, 10, 205–227.

Брик, Д. В. (2015). Некондиційні горючі копалини України та перспективи їх залучення для енергетичних потреб. У *Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні*: збірник наукових статей VIII Міжнародної науково-практичної конференції (с. 73–78). Львів: ЛьВЦНТЕІ.

Брик, Д. В., Гвоздевич, О. В., & Кульчицька-Жигайло, Л. З. (2013). Геотехнологія спалювання вугільних блоків відпрацьованих шахт для отримання теплової енергії. *Углекимический журнал*, 1–2, 73–78.

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., Макітра, Р., & Кальмук, С. (2008). Вплив світової енергетичної кризи на перспективи процесу газифікації вугілля. *Праці Наукового товариства імені Шевченка. Хемія і геохімія*, 21, 198–211.

- Брик, Д. В., Павлюк, М. І., & Макітра, Р. Г. (2006). Синтетичне паливо з вугілля перспективний замітник нафти і природного газу. *Углекимический журнал*, 3–4, 3–9.
- Брик, Д. В., Подольський, М. Р., & Гвоздевич, О. В. (2014). Фізико-технічне обґрунтування виробництва синтетичного палива з вугілля (на прикладі Львівсько-Волинського басейну). *Углекимический журнал*, 4, 69–74.
- Брик, Д. В., & Стефанік, Ю. В. (2010). Газифікація некондиційного вугілля Львівсько-Волинського басейну. *Углекимический журнал*, 1–2, 20–32.
- Владимиров, Ю. В. (2001). Анализ перспектив использования в Украине возобновляемых источников энергии. У *Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: збірник наукових статей І науково-практичної конференції* (с. 16–20). Львів: ЛьВЦНТЕІ.
- Вороновський, Г. К., Денисюк, С. П., & Кириленко, О. В. (2005). *Енергетика світу та України. Цифри та факти*. Київ: Українські енциклопедичні знання.
- Забигаїло, В. Е., & Храпкин, С. Г. (1989). Геологическая база угольной промышленности УССР и современные проблемы угольной геологии. *Геология и геохимия горючих ископаемых*, 72, 1–5.
- Иванова, А. В., & Зайцева, Л. Б. (1982). *Проблема генезиса соленых углей Западного Донбасса*. Киев: Наукова думка.
- Иванова, А. В., & Кривега, Т. А. (1985). *Соленые угли Западного Донбасса*. Киев: Наукова думка.
- Ион, Д. С. (1984). *Мировые энергетические ресурсы*. Москва: Недра.
- Иванців, О. Є., Кухар, З. Я., & Брик, Д. В. (2001). Нові підходи до перспектив підземної газифікації вугільних родовищ України. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 2, 129–134.
- Иванців, О. Є., Лизун, О. С., & Кухар, З. Я. (1999). Геолого-екологічні та соціальні проблеми Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 2, 20–28.
- Ковальчук, Н. Р. (1985). Оценка топливных ресурсов менилитовых сланцев Карпат и пути их перевода в кондиционные запасы. В *Геотехнологические проблемы топливно-энергетических ресурсов Украины: сборник научных трудов* (с. 122–131). Киев.
- Крейнин, Е. В., & Зоря, А. Ю. (2009). Проблемы подземной газификации углей. *Химия твердого топлива*, 4, 24–28.
- Куровець, І. М., Михайлов, В. А., Зейкан, О. Ю., Крупський, Ю. З., Гладун, В. В., Чепіль, П. М., Гулій, В. М., Куровець, С. С., Касянчук, С. В., Грищик, І. І., & Наумко, І. М. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: Кн. 1. Нетрадиційні джерела вуглеводнів: огляд проблеми*. Київ: Ніка-центр.
- Майстренко, А. Ю., Дудник, А. Н., & Яцкевич, С. В. (1998). *Технологии газификации углей для парогазовых установок*. Киев: Знание.
- Макітра, Р. Г., Мідяна, Г. Г., & Брик, Д. В. (2013). Перспективи одержання синтетичного рідкого палива шляхом сумісного піролізу вугілля з відпадами полімерів. *Углекимический журнал*, 3–4, 84–87.
- Мисак, Й. С., Пісько, М. С., Близнюк, В. Ф., & Цепак, О. Г. (2005). Перспективи зменшення споживання первинних енергетичних ресурсів за рахунок впровадження соломоспалювальних котлів. У *Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: збірник наукових статей ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції* (с. 132–137). Львів: ЛьВЦНТЕІ.
- Михайлов, В. А., Зейкан, О. Ю., Коваль, А. М., Загнітко, В. М., Гуров, С. П., Вишва, С. А., Шнюков, Є. Ф., Наумко, І. М., Чепіль, П. М., Кожушок, О. Д., Радченко, В. В., & Безродний, Д. А. (2013). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: Кн. 7. Метан вугільних родовищ, газогідрати, імпактні структури і накладені западини Українського щита*. Київ: Ніка-центр.



- Міністерство енергетики України. (2020). *Інформаційна довідка про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України за грудень та 2019 рік*. Взято 01.03.2021 з [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245436840&cat\\_id=35081](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245436840&cat_id=35081)
- Пожидаев, С. А., Грицай, Р. А., & Иванова, А. В. (1981). *Методические разработки по изучению соленых углей Западного Донбасса*. Киев: Наукова думка.
- Порфір'єв, В. Б., Грінберг, Й. В., & Ладиженський, М. Р. (1963). *Менілітові сланці Карпат*. Київ: Видавництво АН УРСР.
- Рапопорт, И. Б. (1950). *Искусственное жидкое топливо*. Москва; Ленинград: Гостоптехиздат.
- Рудько, Г. І. (Ред.). (2014). *Енергетичні ресурси геологічного середовища України (стан та перспективи)*. Чернівці: Букрек.
- Семенов, В. Г. (2007). Цивілізація без нафти: біодизельне паливо у топливно-енергетичному комплексі України. У *Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: збірник наукових статей IV Міжнародної науково-практичної конференції* (с. 157–162). Львів: ЛьВЦНТЕІ.
- Стан та перспективи видобутку та використання метану вугільних родовищ України. (2014). Нетрадиційний газ в Україні. <http://shalegas.in.ua/cbm-in-ukraine-perspectives>
- Стефанік, Ю. В. (1990). *Геотехнология некондиционных твердых топлив*. Киев: Наукова думка.
- Терентьев, Г. А., Тюков, В. М., & Смаль, Ф. В. (1985). *Производство альтернативных моторных топлив и их применение на автомобильном транспорте*. Москва: ЦНИИТЭ Нефтехим.
- Узіюк, В. І., Бик, С. І., & Ільчишин, А. В. (2001). Газогенераційний потенціал кам'яно-вугільних басейнів України. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 2, 110–121.
- Уилсон, К. Л. (1985). *Уголь – «мост в будущее»*. Москва: Недра.
- Фальбе, Ю. М. (Ред.). (1980). *Химические вещества из угля*. Москва: Химия.
- Фальштинський, В. С., Дичковський, Р. О., & Табаченко, М. М. (2010). Новітня технологія розробки вугільних пластів на базі свердловинної газифікації. *Уголь України*, 1, 10–13.
- Шендрик, Т. Г., Симонова, В. В., & Потоцкая, Л. Л. (1986). Распределение натрия в «соленых» углях Западного Донбасса. В *Структура и свойства ископаемых углей* (с. 59–67). Киев: Наукова думка.
- Шиллинг, Г.-Д., Бонн, Б., & Краус, У. (1976). *Газификация угля: горное дело – сырье – энергия*. Москва: Недра.
- Янко, С. В., & Трошенькин, Б. А. (2010). Перспективы освоения глубокозалегающих угольных месторождений. *Уголь Украины*, 10, 3–10.
- Duncan, W. (1981). Oil: an interlude in a century of coal. *Chemistry and Industry*, 9, 311–316.
- Statistical review of world energy*. (2020). <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Walters, E. A., & Wewerka, E. M. (1975). An overview of the energy crisis. *Journal of Chemical Education*, 52(5), 282–288. <https://doi.org/10.1021/ed052p282>

Стаття надійшла:  
07.04.2021



**Dmytro BRYK, Myroslav PODOLSKYY,  
Yury KHOKHA, Oleksandr LYUBCHAK,  
Lesia KULCHYTSKA-ZHYHAYLO, Oleh GVOZDEVYCH**

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

**SUBSTANDARD CARBON-CONTAINING RAW MATERIALS  
AND METHODS OF THEIR THERMOCHEMICAL PROCESSING**

The analysis of the structure of consumption of primary energy resources in the world and in Ukraine are carried out. It is shown that in recent decades the share of coal is stable at 25–30 % and does not show a tendency to decrease. Similar patterns are observed in Ukraine too. It is established that in Ukraine the energy potential of reserves of substandard carbon-containing raw materials is commensurate with the deposits of conditioned coal and can be used to increase the country's energy security. At the same time, the deterioration of environmental indicators in the world and in Ukraine requires an increase in the level of environmental safety in the use of carbon-containing raw materials and appropriate environmental modernization of its thermochemical conversion methods.

The paper reviews the methods of thermochemical processing of substandard carbon-containing raw materials (pyrolysis and coking, hydrogenation, gasification) and shows that the gasification process, which allows processing of various substandard fuel resources in terrestrial and underground conditions, is the most promising for environmental safety use.

It is shown that developed terrestrial gasification methods are characterized by insufficient productivity of gas generators, significant capital costs for their installation and negative impact on the environment. In addition, terrestrial processing of low-quality coal is not a waste-free technology and does not solve the problem of “secondary” gasification residues recycling. Some of these shortcomings can be eliminated by using the method of underground gasification, in which there is no need to extract coal to the surface, and secondary waste remains underground.

*Keywords:* energy resources, carbon-containing raw materials, coal, environmental conversion.