

КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РІДКОГО ПАЛИВА, ГАЗУ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Україна має значні запаси кам'яного та бурого вугілля, сапропелітів, торфу, горючих сланців, але в паливному балансі країни здебільшого використовують кам'яне вугілля. Нині у зв'язку з необхідністю диверсифікації паливного балансу змінюються підходи до формування нових планів розвитку паливно-енергетичного комплексу (ПЕК).

Мета публікації – оцінення шляхів розвитку вугільного комплексу в системі ПЕК України, зокрема, комплексного використання вугілля для виробництва синтетичного рідкого палива (СРП), газу та електроенергії.

ПОКЛАДИ

Значну частину вугілля, що нині видобувають (майже 70 %), спалюють в енергетичних установках. Але існує велика група вугілля, яку за складом і властивостями доцільніше використовувати як сировину для одержання вторинного палива і непальних продуктів. Як сировина для технологічного перероблення найбільшу цінність має реакційноздатне вугілля, до якого належить значна частина кам'яного та всі види бурого вугілля.

Згідно із загальним оцінюванням у надрах України міститься близько 300 млрд т вугілля. Станом на кінець 2004 р. підтверджені запаси вугілля, тобто запаси, які можна добути за теперішніх економічних й експлуатаційних умов, становили 34 млрд т, у тому числі напівбітумінозного і бурого вугілля – 18 млрд т. Запаси бурого вугілля зосереджені переважно в Дніпровському басейні, а також у Прикарпатті і Закарпатті.

З огляду на те що запаси рідкого і газоподібного палива обмежені і їх імпорт значно перевищує власний видобуток, сучасну вугільну промисловість варто розглядати як основний енергетичний ресурс України на тривалу перспективу.

ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ

Основними способами перероблення твердого палива є: термічна деструкція, газифікація окиснювачами і гідрогенізація. Ефективність зазначених способів оцінимо передусім для одержання СРП та електроенергії.

У промисловості процеси термічної деструкції реалізовано способами коксування, напівкоксування і піролізу твердих горючих копалин. У результаті одержують якісніше тверде паливо, рідкі продукти й газ.

Найбільш багатотоннажним продуктом перероблення вугілля є кокс, який використовують у величезних кількостях у чор-

© КОВТУН Григорій Олександрович. Член-кореспондент НАН України. Заступник директора Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України.

СТЕПАНОВ Анатолій Васильович. Доктор технічних наук. Головний науковий співробітник того ж інституту.

МАТУСЕВИЧ Галина Георгіївна. Кандидат економічних наук. Старший науковий співробітник того ж інституту. (Київ). 2008.

ній металургії і в менших обсягах — в інших виробництвах. У світі коксуванню піддається приблизно 25 % вугілля, яке видобувають.

Продукти коксування можуть замінити нафтові фракції під час виробництва багатьох хімічних продуктів. Однак вони малопридатні для виробництва моторного палива.

Моторне паливо можна одержати в процесі напівкоксування, метою якого є отримання напівкоксу — малодимного сухого палива, рідких продуктів і висококалорійного газу. Сировиною для цього процесу є здебільшого буре, а також кам'яне вугілля, сланці, деревина. Напівкоксування здійснюють при температурі 450–700 °С і середніх та високих швидкостях нагрівання. Вихід продукції напівкоксування становить, %:

напівкокс	— 55–70
газ напівкоксування	— 8–23
смола (рідкі продукти)	— 15–25
підсмольна вода	— 3–10

Смола напівкоксування вугілля і сланців містить переважно складні вуглеводневі оливи, феноли, високомолекулярні смоли, а також велику кількість сірковмісних сполук. У газі головними компонентами є CO_2 , C_nH_m , CO , N_2 . Теплота його згоряння — 16–25 МДж/м³, тобто значно вища, ніж коксового газу. Зі смоли напівкоксування шляхом гідроочищення і гідрокрекінгу можна отримати моторне паливо, що відповідає сучасним стандартам. Газ, одержаний у процесі напівкоксування, як і коксівний газ, може слугувати паливом і сировиною для отримання хімічних продуктів [1].

Витрата палива на напівкоксування вугілля залежить від його складу й орієнтовно становить 1800–2500 МДж/т (34–85 кг умовного палива / т) горючої маси вугілля. Для перероблення отриманого СРП потрібні додаткові витрати енергії. Задовіль-

ні енергетичні показники можна одержати тільки за умови повного використання всіх продуктів напівкоксування.

Газифікація — це виробництво газу в результаті неповного окиснення органічної маси палива. Основне призначення газифікації — одержання екологічно чистого паливного газу, синтез-газу для виробництва рідкого палива, чистого водню, метанолу, аміаку й інших продуктів із кам'яного та бурого вугілля, нафтових залишків, сланців, торфу, деревини, промислових і побутових відходів.

Через високі ціни на нафту і природний газ в останнє десятиліття минулого століття бурхливого розвитку набуває внутрішньоциклова газифікація вугілля для використання газу в парогенераторних установках (ПГУ). Цьому значною мірою сприяла й законодавча база щодо зменшення шкідливих викидів у атмосферу [2, 3].

У процесах газифікації в синтез-газ переходить майже 70 % хімічної енергії палива, а інша частина — в ентальпію синтез-газу. Тому для забезпечення прийнятної значення коефіцієнта корисної дії (ККД) ПГУ необхідний високий ступінь рекуперації фізичної теплоти синтез-газу.

Для ТЕС, залежно від установленого устаткування, якості палива й інших факторів, ККД перебуває в межах 40–46 %. Питомі капітальні вкладення в ТЕС із газифікацією трохи нижчі, ніж для пиловугільних ТЕС, і становлять 1200–1800 \$/кВт устатовленої потужності. Однак установки безупинно вдосконалюють. Це дає підстави для сподівань, що через кілька років їхня вартість становитиме не більш за 1000 \$/кВт, а вугільних паротурбінних ТЕС — близько 1100 \$/кВт. Собівартість виробництва електроенергії залежить здебільшого від ціни палива і звичайно становить 3–3,5 цента за кВт/год.

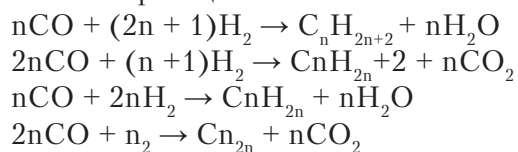
У зв'язку з передбачуваним розвитком водневої енергетики і необхідністю змен-

шення викидів парникових газів ТЕС майбутнього, крім електроенергії, мають виробляти водень та утилізувати вуглекислий газ.

ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією твердого палива успішно розвиваються. Так, наприклад, у США приступили до створення нових ПГУ спеціально для роботи на синтез-газі. Їхній ККД має становити спочатку не менше ніж 55,5 %, а потім – не менше ніж 66,6 %. ККД безпосередньо процесу газифікації при мокрому очищенні сягає 90 %, а при сухому (гарячому) очищенні його можна підвищити до 96 %.

Сьогодні газифікацію твердого палива широко застосовують для забезпечення екологічно чистим паливом (синтез-газом) парогазових енергоблоків, у невеликих масштабах – для виробництва хімічних продуктів, заміника природного газу й у незначній кількості – для виробництва синтетичного рідкого палива. Однак у зв'язку зі значним подорожчанням нафти і природного газу ситуація може змінитися, і роль газифікації для синтезу різних продуктів зростатиме.

Синтетичне рідке паливо можна отримати безпосередньо із синтез-газу ($\text{CO} + \text{H}_2$) способом синтезу Фішера-Тропша, тобто каталітичним гідруванням оксиду вуглецю з утворенням суміші вуглеводнів. Залежно від співвідношення газів ($\text{CO}:\text{H}_2$) у сировині процес синтезу відбувається за такими основними реакціями:



Залежно від видаткового співвідношення $\text{CO}:\text{H}_2$ теоретичний вихід вуглеводнів $[-\text{CH}_2-]_n$ змінюється від 104,3 до 208,5 кг на 1000 м^3 синтез-газу. Крім CO_2 і H_2O , які утворюються за основними реакціями, у результаті небажаних побічних реакцій утворюються також метан, вуглець, спирти

й альдегіди. Залежно від співвідношення $\text{CO}:\text{H}_2$ у вихідному газі, каталізатора й умов процесу утворюються продукти різного складу, % маси:

сухий газ ($\text{C}_1 - \text{C}_2$)	3–15
зріджений газ ($\text{C}_3 - \text{C}_4$)	10–30
бензинова фракція ($\text{C}_5 - 230^\circ\text{C}$)	20–60
газойлева фракція ($230 - 320^\circ\text{C}$)	5–20
парафіни ($320 - 460^\circ\text{C}$)	10–25
залишок ($>460^\circ\text{C}$)	2–10
кисневомісні сполуки	2–5

Практичний вихід рідких продуктів на залізного каталізаторі сягає 170 кг на 1000 м^3 синтез-газу ($\text{H}_2 + \text{CO}$). З урахуванням втрат і витрат на газифікацію вугілля й очищення синтез-газу з 1 тонни горючої маси вугілля можна отримати близько 220 кг вуглеводнів C_{3+} вище. Отже, для одержання 1 тонни цих продуктів потрібно 4,5 т органічної маси кам'яного вугілля. Як видно з наведеного складу продуктів, кількість моторного палива не перевищує 50 % від загального виходу продуктів. Таким чином, для одержання 1 тонни моторного палива необхідно близько 9 тонн органічної маси вугілля. Але варто пам'ятати, що парафіни є корисною сировиною для хімічного виробництва.

Перші заводи з отримання вуглеводнів із синтез-газу було побудовано в Німеччині в 1936 р. У 1944 році виробництво досягло максимуму – 600 тис. т/рік. Після війни всі установки із способом синтезу Фішера-Тропша у ФРН припинили своє існування. В інших країнах будівництво й експлуатація таких заводів тривали здебільшого до 50–60-х років, тобто до відкриття і розроблення великих і гігантських родовищ нафти й газу. Однак робіт щодо синтезу рідких продуктів і метану із синтез-газу не припиняли, їх проводили в США, СРСР, Німеччині та інших країнах.

Тільки в ПАР унаслідок ембарго нафти в 1955 р. фірма «Sasol» побудувала завод

із виробництва рідкого палива й хімічних продуктів із вугілля потужністю 0,4 млн т/рік. У 1981 і в 1983 рр. було введено в експлуатацію ще два заводи потужністю по 2 млн т/рік кожний. Для виробництва 4,4 млн т рідких продуктів переробляють 33 млн т кам'яного вугілля, тобто для одержання 1 тонни вуглеводнів потрібно 7,5 т кам'яного вугілля.

За даними німецьких дослідників, за умови використання нових гетерогенних катализаторів на основі заліза та нових проектних рішень процесів газифікації і синтезу витрати енергії на одержання 1 тонни СРП із кам'яного вугілля становитимуть 141 ГДж, тобто 4,8 т умовного палива. За газифікації донецького кам'яного вугілля з теплою згоряння 23900–25500 кДж/кг його витрата на 1 тону СРП становитиме 5,9–5,5 т, а витрата вугілля на 1 тону моторного палива — близько 12 т.

Буре вугілля України в середньому має вологість 40–55 % і вміст золи — 15–23 %, а в горючій масі палива міститься близько 20 % кисню. Нижча теплота згоряння в межах 7100–12600 кДж/кг. Отже, на 1 тону СРП потрібно 11–20 т бурого вугілля залежно від його складу.

Як вважає академік НАН України Валерій Кухар, заводи з виробництва рідкого палива за способом Фішера—Тропша, а також з використанням метанолу (спосіб фірми «Shell») засвідчують нині для більшості країн скоріше демонстраційний характер можливостей сучасної каталітичної хімії [4].

З бурого і коксівного кам'яного вугілля економічніше одержувати СРП і висококалорійний газ іншими способами: напівкоксуванням, гідрогенізацією, зрідженням.

Сьогодні відносно економічним способом виробництва СРП є гідрогенізація вугілля. Процес здійснюють при температурі 350–450 °С під високим парціальним тиском водню. Катализаторами слугують сульфід вольфраму і молібдену або заліза, ко-

бальту й інших металів, а також зазначені метали на носіях [1, 5].

На катализаторах під впливом водню відбувається руйнування неміцних міжмолекулярних і внутрішньомолекулярних зв'язків у органічній масі вугілля. Високомолекулярні сполуки вугілля перетворюються в низькомолекулярні вуглеводні, воду й газоподібні сполуки сірки та азоту. Зміною технологічних параметрів і підбором катализаторів процес гідрування можна скерувати в напрямі одержання заданих кінцевих продуктів.

У промисловому масштабі освоєно декілька способів зрідження вугілля. Найпоширенішим є термічне або високотемпературне зрідження. Процес проводять при температурі 350–450 °С і тиску 15–30 МПа. Використовують катализатори на основі заліза і деяких інших перехідних металів, основна функція яких полягає в активізації молекулярного водню. Конверсія сировини, залежно від її метаморфізму й умов процесу, становить від 20 до 90 %. За умови перероблення кансько-ачинського вугілля з теплою згоряння 14,65 МДж/кг для одержання 1 т СРП витрата вугілля становитиме близько 5 т органічної маси, включаючи генерацію пари й електроенергії.

Отримане з твердого палива СРП має консистенцію мазуту або гудрону, і його перероблення вимагає значних витрат. В останні роки найбільш прийнятним і маловитратним способом перероблення такої сировини є гідрокрекінг у суспензійній фазі з наступним двоступінчастим гідроочищенням. Катализаторами можуть бути оксиди і солі заліза, але кращі від інших результати дають природні лімоніти (α — FeOОН). Із СРП виходить майже 23 % бензину, 62 % дизельного палива і 15 % більш важких фракцій палива.

Гідрогенізацію вугілля (іноді в поєднанні з процесами зрідження) вважаємо найперспективнішим шляхом одержання рід-

ких продуктів із бурого і кам'яного вугілля, сланців, важкої нафти і бітумінозних пісків.

ПЕРСПЕКТИВИ

Протягом ХХ століття внаслідок обмеженості запасів викопного палива, особливо нафти, було запропоновано різні способи перероблення твердого палива на СРП. Але, як видно з поданого вище аналізу основних процесів одержання СРП, усі вони енергоємні. Тому завдання полягає не в тому, щоб узагалі одержувати СРП, а в тому, щоб одержувати його відносно дешевими способами.

З розвитком нафтової та газової промисловості виробництво СРП із вугілля поступово припинялося через збитковість. Сьогодні виробництво СРП із вугілля в промислових масштабах існує тільки в ПАР. Але останніми роками виробництво СРП і горючих газів відроджується. У багатьох країнах триває робота з удосконалення і створення нових технологій одержання СРП. У Китаї будують великий завод для одержання синтетичної нафти з вугілля, а також завод для газифікації вугілля під високим тиском.

Сьогодні політика більшості країн із розвинутою вугільною промисловістю спрямована на те, щоб безупинно забезпечувати стан технічної готовності до того часу, коли заміна нафти вугіллям стане об'єктивно вигідною з економічних причин або через стратегічну необхідність.

Найбільш придатним для одержання рідкого палива у великих обсягах є, як було відзначено, буре вугілля. Якщо нафта дорожчатиме надалі такими ж темпами, як і зараз, то вже через 5–6 років виробництво СРП із вугілля може стати рентабельним [6].

У більшості випадків видобування низькоякісного палива (високозольного кам'яного та бурого вугілля, торфу, сланців, важкої нафти) буде рентабельним тільки за умови його комплексного перероблення

на місці видобутку. Необхідно створювати енергохімічні комплекси, які б поєднували хімічне перероблення палива з виробленням електроенергії. У результаті можна буде виробляти моторне паливо і різноманітну хімічну продукцію.

Спалювання і газифікація високозольного палива навіть після його збагачення призводить до великого виходу шлаків і золи. З метою поліпшення екологічної ситуації бажано, щоб до технологічного комплексу входив цементний завод. На базі шлаків і золи з деяких сортів вугілля можна виробляти цемент із міцністю на стиснення 30 н/мм², а з гіпсу (відходи сіркоочищення) — суху штукатурку. Таким чином, енергохімічний комплекс із замкнутим циклом виробництва може бути маловідходним і високорентабельним.

Залежно від цільових продуктів, якості вугілля, можливих інвестицій та інших факторів склад вуглепереробного комплексу буде різним. Але в усіх випадках підприємство повинно бути екологічно чистим, таким, що забезпечує санітарні норми викидів шкідливих речовин в атмосферу і водойми.

На рис. 1 представлено вуглепереробний комплекс для виробництва моторного палива і електроенергії на базі напівкоксування вугілля [6]. Рідкі продукти напівкоксування піддають гідроочищенню або гідрокрекінгу для одержання товарного моторного палива і бензол-толуол-ксилольної фракції для подальшого хімічного перероблення.

Напівкокс направляють на парокисневу газифікацію. Можлива й повітряна газифікація. Золю і шлак подають на цементний завод або скидають у відвали. Газ, одержаний у процесі напівкоксування, піддають холодному або гарячому очищенню. Частина його надходить на установку витягнення водню, а частина — прямо на ПГУ-ТЕС. Водень подають на установку гідроперероблення, а залишок — на ПГУ-ТЕС,

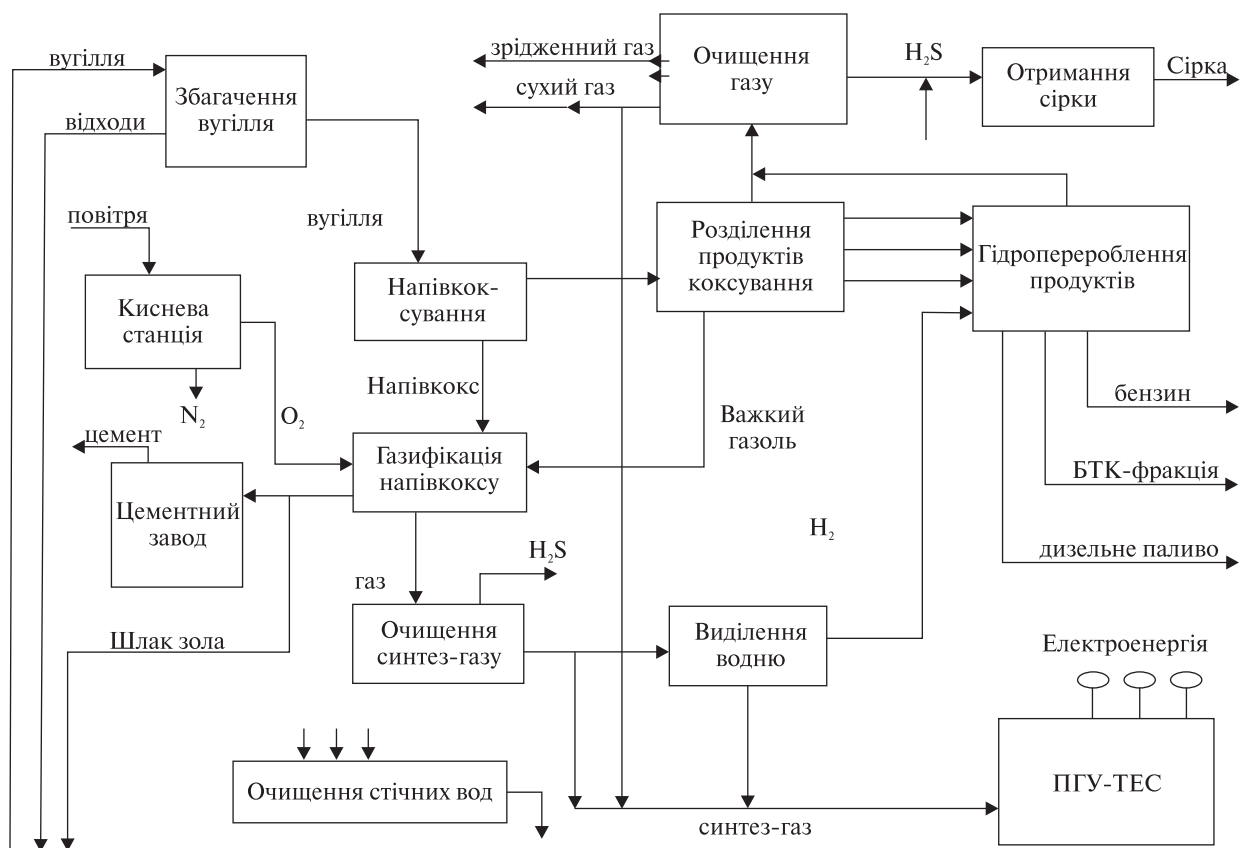


Рис. 1. Принципова схема вуглепереробного енергохімічного комплексу на базі напівкоксування вугілля.

куди подають також частину сухого газу. Кислі гази з установки очищення коксового газу і синтез-газу направляють на установку Клауса для одержання комової сірки. Особливу увагу треба приділяти очищенню стічних вод, що утворюються під час гасіння шлаку й у процесі очищення синтез-газу.

Наприклад, вуглепереробний енергохімічний комплекс потужністю 8 млн т/рік за органічною масою бурого вугілля забезпечуватиме газовим паливом парогазову ТЕС потужністю 2400 МВт і вироблятиме близько 1,5 млн т/рік моторного палива та 1 млн т/рік висококалорійного газу.

На рис. 2 представлено енергохімічний комплекс на базі гідрогенізації вугілля [6]. Для перероблення придатні коксівне кам'яне і будь-які види бурого вугілля. Вугілля

після збагачення має містити не більш ніж 5 % золи. Потім його осушують до вмісту вологи не більш ніж 2 % і направляють у секцію приготування вугільно-оливної пасти. Для цього використовують залишкові продукти власного виробництва. У процесі гідрогенізації при середньому тиску в гідрогенізіат переходить близько 70–75 % органічної маси вугілля. Як і в попередньому прикладі, гідрогенізіат піддають подальшому гідропереробленню до одержання товарних продуктів. Після відділення гідрогенізіату шлам газифікують, відбираючи із синтез-газу водень, необхідний для гідрогенізації вугілля і гідроперероблення гідрогенізіату.

У шламі залишається не більш ніж 25–30 % органічної маси сировини. За умови перероблення 8 млн т органічної маси бурого вугілля потужність ПГУ-ТЕС

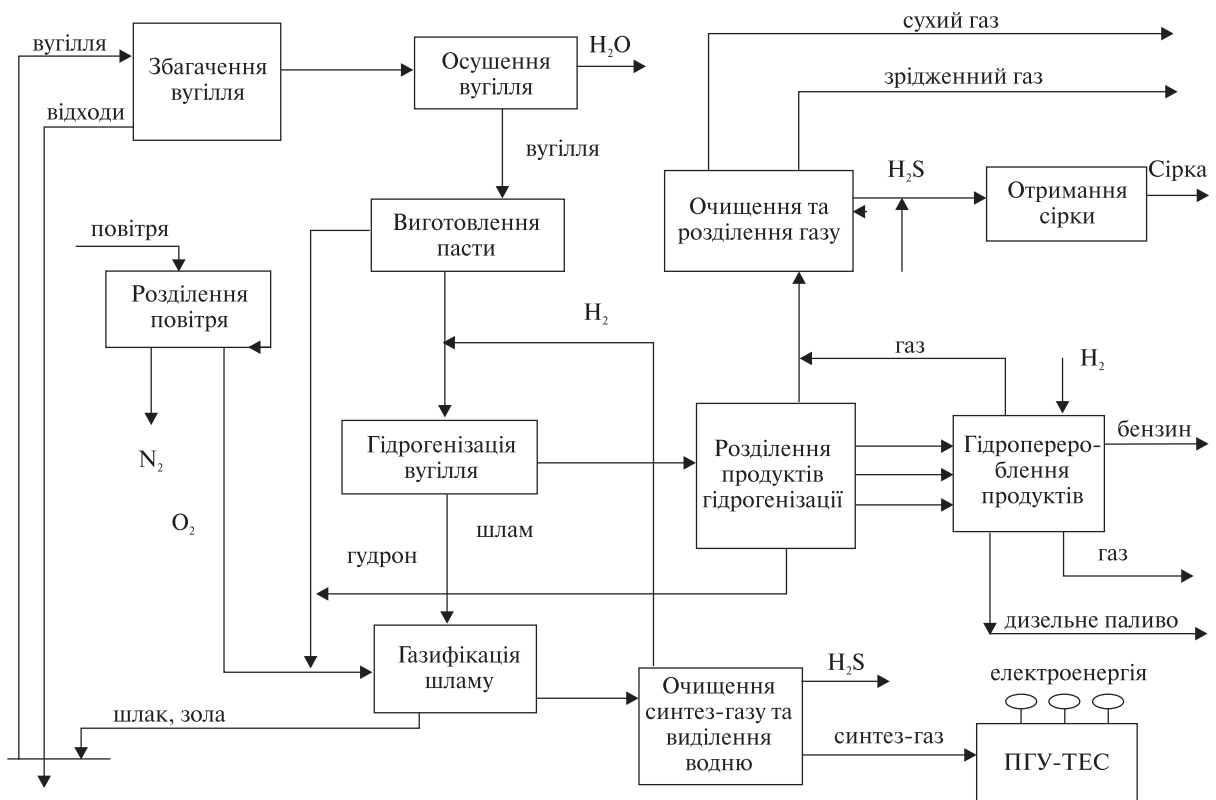


Рис. 2. Принципова схема вуглепереробного енергохімічного комплексу на базі гідрогенізації вугілля.

сягатиме 1000 МВт, але виробництво СРП становитиме близько 3 млн т/рік.

Як уже було зазначено, вуглепереробний комплекс має перебувати неподалік від вуглевидобувних кар'єрів або шахт, і вугілля необхідно подавати на збагачення пневмо- або гідротранспортом. У такий самий спосіб відходи збагачення потрібно повертати в порожнечі, що утворилися після видобування вугілля.

Розглянуті комплекси можуть бути рентабельними за ціни вугілля 0,25–0,35 % від ціни нафти за одиницю умовного палива або нафтового еквівалента. Крім того, потужність комплексу має бути порівнянною з потужністю великого НПЗ, тобто не нижчою за 6–8 млн т/рік за органічною масою вугілля.

В Україні таке перероблення вугілля буде рентабельним за ціни газу \$200–250 за 1000 м³ [6]. За умови нестачі власних

ресурсів нафти і газу комплексне енергохімічне перероблення вугілля дозволить знизити їх імпорт.

1. Химические вещества из угля / Под ред. Ю. Фальбе. — М.: Химия, 1980. — 516 с.
2. *Потапенко И.О.* Перспективы производства экологически чистого топлива для электростанций на основе газификации углей // Химия твердого топлива. — 2003. — №6. — С. 85–92.
3. *Саламов А. А.* Парогазовые установки с газификацией топлива и сокращением выбросов CO₂ // Теплоэнергетика. — 2005. — №2. — С. 78–80.
4. *Кухар В.П.* Україна має поспішати з освоєнням альтернативних палив // Вісник Національної академії наук України. — 2007. — №4. — С. 42–46.
5. *Кранцин И.П., Потапенко Е.Ю.* Перспективы производства синтетического жидкого топлива из углей // Химия твердого топлива. — 2004. — № 5. — С. 59–65.
6. *Степанов А.В., Ковтун Г.А., Матусевич Г.Г., Сульжик Н.И.* Ресурсосбережение и энергохимическое использование нефти. — К.: Наукова думка, 2008. — 240 с.

Г. Ковтун, А. Степанов, Г. Матусевич

**КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ ДЛЯ
ВИРОБНИЦТВА РІДКОГО ПАЛИВА
ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Резюме

У статті розглянуто можливості комплексного використання низькоякісного палива й наведено дані щодо енергоємності окремих процесів його перероблення. Запропоновано створення енергохімічних комплексів, що мають поєднувати виробництво синтетичного рідкого палива й електроенергії з високозольного кам'яного та бурого вугілля. Наведено принципові технологічні схеми виробництва моторного палива та електроенергії на базі напівкоксування й гідрогенізації вугілля.

G. Kovtun, A. Stepanov, G. Matusevich

**COMPLEX USE OF COAL FOR LIQUID FUEL, GAS,
AND ELECTRIC POWER MANUFACTURING**

Summary

Opportunities of complex use of low quality fuel are considered and data concerning power consumption of their separate process processing are presented. Creation of energychemical complexes which would unite manufacturing of synthetic liquid fuel and the electric power from highly cindery stone and brown coal is offered. Basic technological schemes of motor fuel and the electric power manufacturing on the basis of coal half coking and hydrotransformation are presented.