

В. І. РУДИКА
ДП «Гипрококс»
О.В. ЛЕЛЮК,
НДЦ ІПР НАН України

АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ЗРІДЖЕННЯ ВУГІЛЛЯ У ПРЯМИЙ СПОСІБ

Представлено аналіз світового досвіду комерціалізації технологій зрідження вугілля у прямий спосіб. Встановлено, що в світі вже накопичено достатньо досвіду з конверсії вугілля у синтетичне рідке паливо. Усі технології зрідження вугілля поділяються на одно- та двостадійні. В статті представлена їх порівняльна характеристика та визначено ступінь комерціалізації. Порівняння технічних характеристики зарубіжних технологій дозволило віддати перевагу технологію CTSL (HTI) для переробки українського низькосортного вугілля.

Ключові слова: моторне паливо, синтетичне рідке паливо, вугілля, комерціалізація

V. I. RUDYKA
DP «Giprokoks»
O.V. LELIUK
NDC IPR NAN Ukrainy

ANALYSIS OF WORLD EXPERIENCE OF COMMERCIALIZATION OF COAL COMBUSTION TECHNOLOGIES BY DIRECT METHOD

The world experience analysis of commercialization of coal liquefaction technologies in the direct way is presented. All coal liquefaction technologies are divided into one- and two-stages. The article presents their comparative characteristics and determines the degree of commercialization. Comparison of technical characteristics of foreign technologies has made it possible to give preference to the technology of CTSL (HTI) for the processing of Ukrainian low-grade coal.

Keywords: motor fuel, synthetic liquid fuel, coal, commercialization

Постановка проблеми. Україна є багатою за енергетичним потенціалом країною світу, однак його основу складає вугілля. За даними British Petroleum в Україні зосереджено 3,8 % від світових запасів вугілля, що дозволить їх задовольняти власні потреби у цьому виді палива (reserves-to-production ratio) протягом наступних 316 років [1]. Однак, за іншими видами традиційних паливно-енергетичних ресурсів національне господарство відчуває гострий дефіцит. Так, у 2016 р. імпортна залежність за природним газом становила 32 %

(це найнижчий показник з часів незалежності України), за нафтою – 24 % (внаслідок занепаду національної нафтопереробки), а за бензином – 66 %. Відтак, вкрай гостро постають проблеми щодо забезпечення національних потреб моторного палива та імпортозаміщення його зарубіжних аналогів. Єдино можливим способом (за відсутності достатнього нафтового потенціалу) є конверсія інших вуглеводнів в різні види моторного палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання виробництва синтетичного рідкого палива (СРП) в Україні тривалий час курсують в національному науковому середовищі. Окремі дослідники [2] вивчають перспективи переробки в СРП природного газу та приходять до висновку про економічну доцільність «переходу нафтогазовидобувних компаній на інноваційні GTL-технології». Другі [3] розглядають СРП як джерело покриття потреб України не тільки в моторному паливі, але і для виробництва електроенергії на газомазутних ТЕС і ТЕЦ. Інші [4] вважають оцінюють інвестиційну привабливість виробництва СРП з незатребуваного в Україні бурого вугілля. Загалом, значущість проблеми освоєння виробництва СРП з вугілля в Україні підкреслюється в багатьох публікаціях [5, 6]. Однак, й надалі існують певні сумніви щодо комерційних успіхів таких проектів, що обумовлює необхідність подальших досліджень за цією тематикою. Одним з перших етапів вирішення цієї проблеми є систематизація зарубіжного досвіду з комерціалізації виробництва СРП.

Формулювання цілі статті. Метою статті є аналіз світового досвіду комерціалізації технологій зрідження вугілля у прямий спосіб та вибір найперспективнішої з них для впровадження в національну практику.

Виклад основного матеріалу дослідження. Історія освоєння технологій зрідження вугілля у прямий спосіб починається з першої промислової установки гідрогенізації, яку було введено в дію у Німеччині у 1927 р. потужністю 100 тис. т на рік [7]. Широке застосування технології прямого зрідження вугілля знайшли у роки Другої світової війни в тій же Німеччині у зв'язку із значним дефіцитом нафтової сировини, викликаним торгівельною блокадою країни. Після завершення Другої світової війни з 1945 р. штучне рідке паливо вступило у відкриту економічну конкуренцію з нафтовим паливом і у цілому прогало цю боротьбу. Це був період згортання промисловості СРП.

Інтерес до виробництва СРП відновився після 1973 р., в період світової нафтової кризи наслідком чого стало швидке зростання цін на сиру нафту. Тоді

перед людством реально стала загроза виснаження дешевих і доступних нафтових ресурсів на фоні надмірного видобутку нафти.

Передбачення такого розвитку подій у світовому нафтовидобуванні ще до їх прояву змусило США ще у 1968 р. прийняти до виконання державну програму комерціалізації зрідження і газифікації вугілля (Commercialization of coal liquefaction and gasification), яка тривала рекордно довго – 26 років (1968 – 1995 рр.). В рамках цієї програми за фінансової підтримки Департаменту енергетики США (DoE) і приватних компаній (1990 – 1995 рр.) було розроблено низку нових технологій прямого зрідження вугілля, які і стали основою сучасних процесів промислового виробництва СРП.

Сучасні технології зрідження вугілля у прямий спосіб можна розділити на одно- та двостадійні процеси [8] (табл. 1).

Таблиця 1

Технічна характеристика основних технологій зрідження вугілля у прямий спосіб [9]

Назва технології	Країна	Тип технології	Вид вугілля	Ступінь конверсії вугілля	Ступінь комерціалізації
H-Coal	США	Одно-стадійна	1) Illinois Bituminous 2) Wyoming Subbituminous	91	Пілотна установка
Solvent Refined Coal	США	Одно-стадійна	Kentucky Bituminous Coal	91,1	Пілотна установка
Exxon Donor Solvent	США	Одно-стадійна	1) Illinois No. 6 bituminous (Monterey) 2) Wyoming subbituminous (Wyodak) 3) Texas lignite	90,8	Комерційна установка
Catalytic Multi Stage Liquefaction – CMSL (HTI)	США	Дво-стадійна	1) Illinois No. 6 bituminous 2) Ohio No. 6	95	Пілотна установка
Catalytic Two Stage Liquefaction – CTSL (HTI)	США	Дво-стадійна	3) Wyoming subbituminous (Wyodak)	94,5	Пілотна установка
Shenhua process	Китай	Дво-стадійна	Кам'яне вугілля провінції Shenhua	94	Комерційна установка
NEDOL	Японія	Дво-стадійна	Кам'яне вугілля провінції Shenhua	95,3	Пілотна установка

Аналіз одностадійних технологій зрідження вугілля виявив їх характерну властивість – середній вихід товарних продуктів (пропан-бутан, бензин, дизель, нафта) сягає 40%. Важкі фракції і вугілля, що не прореагувало, спрямовуються до реактору для повторного циклу. Це свідчить про перевагу цієї технології у порівнянні з традиційною переробкою нафти, коли вихід товарних продуктів з важких фракцій досягається за рахунок використання дорогих технологічних установок (каталітичний крекінг, риформінг).

Основою двостадійних процесів зрідження вугілля є технологія Solvent Refined Coal. Двостадійні процеси відрізняються використанням двох реакторів, у яких відбувається зрідження, що дозволяє досягти раціоналізації технологічного процесу і зниження витрат водню. Використання двостадійних процесів дає можливість досягти більш високого виходу паливних фракцій і ефективності використання водню в порівнянні з одностадійними процесами (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняльна характеристика технологічних одно- і двостадійних процесів гідрогенізації [10]

Показник	Технологічні процеси				
	SRC	H-Coal	EDS	ITSL	CMSL
Рік впровадження технології	1980	1981	1970	1989	1994
Кількість реакторів зрідження	1	1	1	2	2
Температура в реакторі, °C	446-465	426-454	426-500	448-454	401
Тиск в реакторі, фунтів на квадратний дюйм	2000	3000	2000-3000	2500	2500
Температура у другому реакторі (двостадійні технології), °C				404-432	442-451
Тиск у другому реакторі (двостадійні технології), фунтів на квадратний дюйм				2500	2500
Споживання вугілля на добу, т	30	200	250	~ 6	3
Вихід, % маси					
Вода і оксиди вуглецю H ₂ O+CO _x	12,9	11,3	17,4	15,2	15,2
Газова фракція	14,5	12,8	19	5,4	11,4
Нафта	19,3	22,9	22,8	14,5	20,7
Бензинова і дизельна фракція	25,2	20	17	21,7	39,1

продовження таблиці 2

Газойль	4,9	7,6	4,4	29,6	12,5
Всього дистилатів	49,4	50,5	44,2	65,8	72,3
Споживання водню	5	6	5,9	6	7,5
Ефективність використання водню, фунт рідких фракцій / фунт спожитого водню	9,5	8,4	7,5	11	9,7

Двохстадійні процеси були відпрацьовані на базі установки Wilsonville потужністю 6 т на день. Спочатку технологія Solvent Refined Coal-II, була відпрацьована за двома технологічними процесами з використанням обладнання і технологій двох різних груп компаній: ITSL (Integrated Two-Stage Liquefaction) та CMSL (Catalytic Multi-Stage Liquefaction). Сутність двохстадійних процесів полягає у використанні двох реакторів, у яких відбувається зрідження насиченої воднем вугільної суміші і залишків речовин від попереднього циклу роботи. Кожен з реакторів має особливі параметри температури і тиску.

Застосування двох реакторів дозволило підвищити вихід товарних продуктів на кожному з циклів і підвищити ефективність використання водню у технологічному процесі. Теоретично застосування двох реакторів можливо в будь-якій із розглянутих одностадійних технологій гідрогенізації. Однак технології США так і залишилися на стадії дослідних установок: 6 т вугілля на день – ITSL – Integrated Two-Stage Liquefaction; 3 т вугілля в день Catalytic Multi-Stage Liquefaction (CMSL). Основною причиною цього стало значне здорожчання виробництва у разі використання двох каталітичних реакторів великої потужності в той час як отримані переваги були незначними.

Досліди щодо використання двохстадійних технологій зрідження вугілля у період 1991 – 2000 рр. проводилися в Японії (процес NEDOL) і Німеччині (процес IGOR).

Наукові розробки двохстадійного процесу зрідження вугілля NEDOL (Японія) було розпочато з 1979 р. Їх сутність полягала у перейманні досвіду впровадження одностадійних процесів гідрогенізації США (H-Coal, Exxon Donor Solvent, SRC-II), і пошуку шляхів їх удосконалення. В результаті у 1984 р. було створено проект заводу потужністю 250 т вугілля на день за власною технологією NEDO. Однак, проект розвивався повільно. Крім того, у

90-х роках з'явилися двостадійні процеси зрідження вугілля і відповідний проект було перероблено. В результаті з'явилася технологія NEDOL. Будівництво дослідного заводу потужністю переробки 150 т вугілля в день було розпочато у 1991 р., однак його запуск відбувся лише у 1998 р.

Процес зрідження вугілля NEDOL є аналогом раніше розглянутих двостадійних процесів гідрогенізації США, однак має кардинальну відмінність – другий реактор зрідження у якості сировини використовує залишки, які не прореагували, а також важкі фракції, що залишилися після відбору товарних продуктів. Дана технологічна особливість дозволяє підвищити насиченість воднем пасти для гідрогенізації, що дозволяє збільшити вихід товарних продуктів.

В результаті вихід рідких товарних продуктів (нафта, бензин, дизельне паливо, гас) в процесі NEDOL склав 58 % від маси сировини. Вихід рідких товарних продуктів у двостадійних процесах США: ITSL – 58,5 %; CMSL – 59,1%.

Історично інтерес до гідрогенізації вугілля в Китаї з'явився, починаючи з 1949 р., у вигляді теоретичних досліджень і дослідницько-конструкторських робіт. З початком зростання світових цін на нафту у 1967 р. у місті Цзінчжоу було побудовано дослідне виробництво. З 1990 р. у Китаї було затверджено пріоритетність технологій зрідження (як прямого, так і непрямого) вугілля з метою їх промислового впровадження. Хронологія впровадження технологій гідрогенізації в Китаї приведена на рис. 1.

У 2008 р. у Китаї запуснено великий завод по гідрогенізації вугілля потужністю 1 млн. т на рік. Особливі технологічні характеристики процесу Шеньхуа [10, 13]:

- споживання вугілля 6000 т на день;
- обсяг синтез-газу, водень з якого виділяється на реакцію гідрогенізації замість чистого водню, в технологічному процесі гідрогенізації – 240 тис. м³ на год.;
- температура в реакторі 445 – 454 °С.

За останніми відомостями розвиток гідрогенізації в Китаї не має економічних перспектив. Основною причиною цього вважається зростання галузі виробництва хімічних продуктів (метанолу, олефінів, диметилового ефіру, етилен-гліколя) в Китаї за допомогою газифікації вугілля і процесу Фішера-Тропша [13].

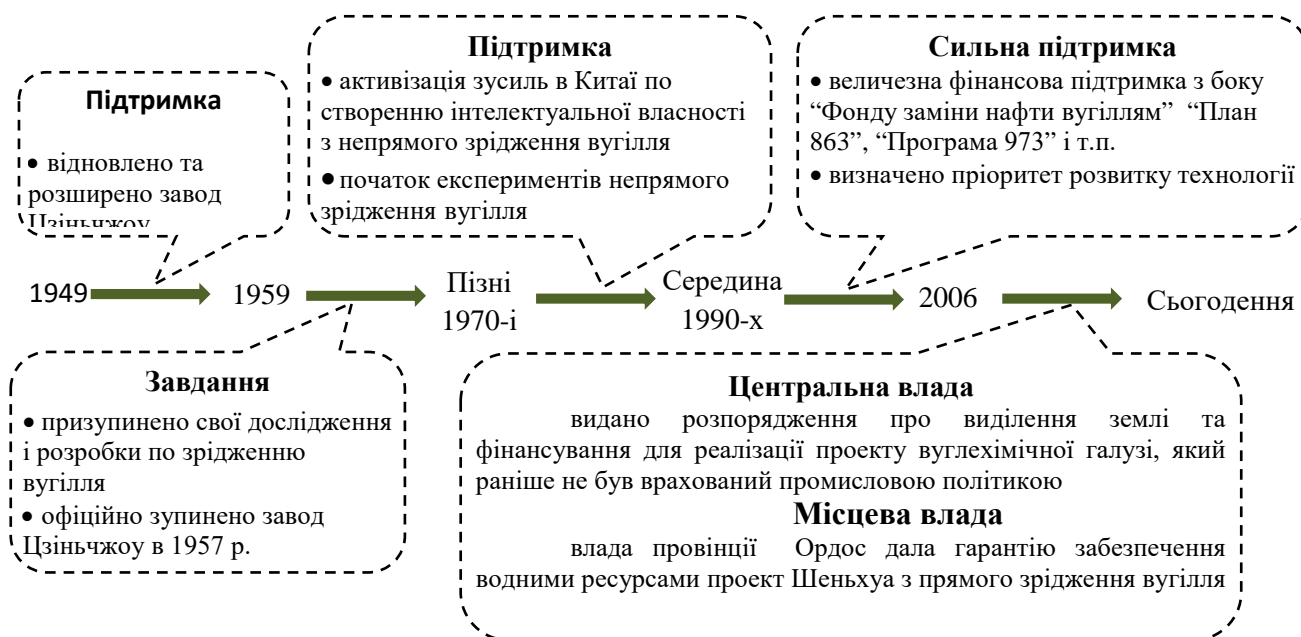


Рис. 1. Хронологія основних етапів впровадження технологій гідрогенізації в Китаї [11, 12]

Зазначеним планом передбачено введення в дію нових заводів СРП та хімічного профілю. В основі цих виробництв використовують процеси Фішера-Тропша, а також технологію «метанол у бензин». Завод Шеньхуа залишається єдиним заводом такого типу, на якому використовується технологія гідрогенізації.

Варто зазначити, що у 2015 р. було укладено угоду між США і Китаєм про зниження викидів діоксиду вуглецю та інших парникових газів в атмосферу [14]. Внаслідок використання в процесі гідрогенізації водню, який отримують з синтез-газу, утворюється велика кількість діоксиду вуглецю. Через це, гідрогенізацію відносять до найбільших джерел утворення відповідних викидів (3,76 млн. т у 2010 р.) [15].

Найбільш відпрацьованою на теперішній час технологією прямого зрідження вугілля слід вважати технологію прямого зрідження низькосортного кам'яного вугілля Catalytic Two Stage Liquefaction – CTSL (НТІ).

Розробку цієї технології було проведено на замовлення департаменту енергетики США у 1990 р. фірмою Амосо. Дослідження проводились на існуючій пілотній установці у місті Вілсонвіль, штат Алабама (до початку дослідів за прототип було обрано технологію Solvent Refined Coal-II). Результати досліджень дозволили суттєво удосконалити технологічний

прототип, що дозволило на основі нової технології розробити проект комерційного заводу зрідження вугілля.

При отриманні попередніх дослідів у 1992 р. фірми Amoco було доручено вдосконалити показники роботи установки з ціллю підвищення швидкості реакцій, зменшення викидів, та дослідити можливість використання природного газу для виробництва водню.

Це розширене дослідження включало в себе:

- розробку та вибір технології для кожної установки;
- виявлення можливості отримання водню для зрідження за допомогою риформінгу природного газу;
- обґрунтування вибору технології газифікації вугілля, за допомогою якої може вироблятися водень (варіанти Техасо або Shell)
- техніко-економічне обґрунтування вартості основного виробництва (ISBL) та оцінку вартості допоміжних процесів і обслуговування (OSBL) (субпідрядник ASPEN PLUS).

Фірмою Amoco було запропоновано два варіанти технологічних схем виробництва синтетичного рідкого палива у спосіб прямого зрідження низькосортного вугілля. Різниця між цими варіантами полягає у способах одержання водню для гідрогенізації вугілля. Перший варіант передбачає одержання водню на основі газифікації вугілля, а другий на основі риформінгу природного газу.

Зважаючи на значний рівень цін в Україні на природний газ для проекту будівництва заводу СРП пропонується перший варіант технологічної схеми. При цьому для газифікації вугілля рекомендується застосування технології ТЕХАСО. Необхідну номенклатуру і обсяги готових продуктів, що будуть вироблятися заводом, а також необхідних для цього матеріальних і енергетичних ресурсів характеризує загальний матеріальний баланс зрідження низькосортного вугілля, наведений у табл. 3.

Таблиця 3

Загальний матеріальний баланс зрідження низькосортного вугілля за
технологією CTSL (HTI)

Сполука	Тис. кг на годину	Тон на добу	Літрів на добу	Мільйон кубічних метрів на добу
Вхід				
Вугілля осушене та без золи (MAF)	883,48	2338		
Попіл у вугіллі	59,45	1572		
Повітря до установки з виділення сірки	47,61			0,93
Повітря до установки з виробництва кисню	1435,78			0,02
Пара до установки з виробництва водню	329,69			
Усього	2755,92			
Вихід				
Пропан	14,05		507892	
Бутан	8,61		267869	
Нафта	64,8505		1554497	
Легкі дистиляти (120-180 °С)	37,187		786,59	
Важкі дистиляти (180-240 °С)	143,306		2875873	
Газойль	129,24		2525418	
Сірка	4,535	108,84		
Аміак	6,349	152,37		
Феноли	1,36	32,65		
Вода для хім. реакцій установок	113,37			
Попіл та шлак	62,58	1501,99		
Високотемпературний паливний газ виробництва 3	38,5475			1,35888
Середньо температурний паливний газ виробництва 9	33,559			2,97255
Газ на спалювання (виробництво -11)	130,608			1,9817
Азот (виробництвао-10)	1051,213			21,34574
Газові викиди до атмосфери з виробництва 9	916,5235			12,37147
Газові викиди до атмосфери з інших джерел	0,13605			0,002831
Усього	2755,92		8446558	

Порівняльну технічну характеристику різних технологій прямого зрідження вугілля представлено у табл. 4, дані якої свідчать, що найбільш ефективними технологіями прямого зрідження вугілля на сьогодні є:

- за критерієм конверсії сировини у синтетичну нафту: CMSL (HTI), NEDOL, Shenhua process, CTSL (HTI),

- за критерієм питомих капітальних вкладень: NEDOL, CTSL (HTI), Shenhua process.

Таблиця 4

Порівняльна технічна характеристика технологій прямого зрідження вугілля

Назва технології	Потужність		Вихід синтетичної нафти та газових фракцій, % маси	Капітальні витрати (всього), млн. дол.	Витрати водню, % маси
	споживання вугілля, т на день	виробництво синтетичної нафти, т на день			
H-Coal		200	59,0	320	5,3
Solvent Refined Coal		50	56,4		4,8
Exxon Donor Solvent	2026,1	250	58,8	341	4,6
Catalytic Multi Stage Liquefaction – CMSL (HTI)	25	6	78,4	н.д.	н.д.
Catalytic Two Stage Liquefaction – CTSL (HTI)	24,9	6	66,0	3,6 (4,04 у разі отримання водню з природного газу)	н.д.
Shenhua process	12800	2740	70,3	2200	н.д.
NEDOL		150	76,9	30	н.д.

Серед перелічених технологій окремо слід визначити технологію CTSL (HTI), яку призначено для переробки низькосортного вугілля, що визначає ще більшу її привабливість для промислового застосування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз зарубіжного досвіду дозволив виявити, що наразі в світі вже існують достатньо розроблені технології для зрідження вугілля у прямий спосіб. Зазначені технології дозволяють виробляти СРП із попередньо властивостями, оминаючи капіталомісткі технологічні процеси традиційної нафтопереробки. Порівняння технічних характеристики зарубіжних технологій дозволило віддати перевагу

технологію CTSL (HTI) для переробки низькосортного вугілля. Саме цю технологію необхідно піддати аналізу на інвестиційну привабливість та визначити ефективність впровадження цього проекту в українських реаліях.

Література

1. Data work book Statistical Review 2016 [Електронний ресурс] / Веб-сайт компанії British Petroleum. – Режим доступу : <http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-workbook.xlsx>
2. Гунда М. В. Розвиток технологій переробки природного газу в рідкі синтетичні палива та перспективи їх впровадження для розробки родовищ вуглеводнів [Електронний ресурс] / М. В. Гунда, Д. О. Єгер, Ю. О. Зарубін, П. М. Сміх, В. В. Гладун, С. В. Касянчук, П. М. Чепіль / Нафтогазова галузь України. – № 1. – 2014. – С. 38 – 42. – Режим доступу : <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/3699/1/5593p.pdf>.
3. Ковтун Г. Комплексне використання вугілля для виробництва рідкого палива, газу та електроенергії [Електронний ресурс] / Г. Ковтун, А. Степанов, Г. Матусевич // Вісник НАН України. – 2008. – № 4. – С. 68 – 75. – Режим доступу : ftp://ftp.nas.gov.ua/akademperiodyka/Downloads/Visnyk_NANU/downloads/2008/4/a7-n4.pdf.
4. Макаров В. М. Аналіз та перспективи розвитку буровугільного комплексу Олександрійського регіону [Електронний ресурс] / В. М. Макаров, М. О. Перов, І. Ю. Новицький // Проблеми загальної енергетики. - 2011. - Вип. 3. - С. 19-24. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2011_3_6.
5. Геотехнология некондиционных твердых топлив. – К.: Наук. думка, 1990. – 268с.
6. Брик Д. Вплив світової енергетичної кризи на перспективи процесу газифікації вугілля [Електронний ресурс] / Д. Брик, Р. Макітра, С. Кальмук / Праці НТШ. Хем. Біохем. – Т. 21. – 2008. – С. 198 – 211. – Режим доступу : <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/74109/15-Bryk.pdf?sequence=1>.
7. Локтев С.М. Искусственное жидкое топливо: прошлое, настоящее, будущее [Електронний ресурс] / С.М. Локтев. – Режим доступу: <https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewiR->

sXhqdnLAhVpCpoKHURjAlMQFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ras.ru%2FFStorage%2Fdownload.aspx%3Fid%3D8a03637b-7447-4b00-ac7f-6dcab453c2ec&usg=AFQjCNH8IHDuhSke5EJwioZhliyqi7IQ4w

8. Ken K. Robinson «Reaction Engineering of Direct Coal Liquefaction» [Электронный ресурс] / Mega-Carbon Company, 5N553 Jens Jensen Lane, St. Charles, IL 60175, USA. – Режим доступа: <https://doaj.org/article/dbe44af4afc248ef97f9a4085d62a8a0>

9. Winslow J. Direct Coal Liquefaction Overview» [Электронный ресурс] / J. Winslow, E. Schmetz // National Energy Agency – Режим доступа: http://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/ccbt/20090409_LTI_DCL-Presentation---Comprehensive-Overview.pdf

10. Burke F.P. Recent advances and future prospects for direct coal liquefaction process development [Электронный ресурс] / F. P. Burke, R. A. Winschel // CONSOL Inc. Research & Development 4000 Brownsville Road. – Режим доступа: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/42_1_SAN%20FRANCISCO_04-97_0313.pdf

11. Kong Z. EROI Analysis for Direct Coal Liquefaction without and with CCS: The Case of the Shenhua DCL Project in China» [Электронный ресурс] / Z. Kong, X. Dong, B. Xu, R. Li, Q. Yin, C. Song // Energies ISSN 1996-1073. – Режим доступа: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/2/786>

12. Zhang Y. Shenhua Coal Conversion Technology and Industry Development» [Электронный ресурс] / Y. Zhang // Shenhua Group Corporation China. – Режим доступа: https://gcep.stanford.edu/pdfs/wR5MezrJ2SJ6NfFl5sb5Jg/16_china_zhangyuzhuo.pdf.

13. Minchener A. J. Coal-to-oil, gas and chemicals in China [Электронный ресурс] / A. J. Minchener // IEA Clean Coal Centre. – Режим доступа: https://www.usea.org/sites/default/files/022011_Coal-to-oil,%20gas%20and%20chemicals%20in%20China_ccc181.pdf

14. Китай и США подписали программу снижения уровня выбросов углекислого газа [Электронный ресурс] / UKRNEWS24. – Режим доступа: <http://www.ukrnews24.net/kitaj-i-ssha-podpisali-programmu-snizheniya-urovnya-vybrossov-uglekislogo-gaza-569/>

15. Clean Coal Technologies in Japan Technological Innovation in the Coal Industry [Электронный ресурс]. / New Energy and Industrial Technology Development Organization. – Режим доступа: <http://www.nedo.go.jp/english/>

References

1. The official site of British Petroleum (2016), “Data work book Statistical Review 2016”, available at: <http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-workbook.xlsx>
2. Hunda, M. V. Yeher, D. O. Zarubin, Yu. O. Smikh, P. M. Hladun, V. V. Kasyanchuk, S. V. and Chepil', P. M. (2014), “Rozvytok tekhnolohiy pererobky pryrodnoho hazu v ridki syntetychni palyva ta perspektyvy yikh vprovadzhennya dlya rozrobky rodovyshch vuhlevodniv”, *Naftohazova haluz' Ukrainy*, [Online], vol. 1, pp. 38-42, available at: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/3699/1/5593p.pdf>.
3. Kovtun, H. Stepanov, A. Matusyevych, H. (2008), “Kompleksne vykorystannya vuhillya dlya vyrobnytstva ridkoho palyva, hazu ta elektroenerhiyi, *Visnyk NAN Ukrainy*, [Online], vol. 4, – pp. 68-75, available at: ftp://ftp.nas.gov.ua/akademperiodyka/Downloads/Visnyk_NANU/downloads/2008/4/a7-n4.pdf.
4. Makarov, V. M. Perov, M. O. Novyts'kyy, I. Yu. (2011). “Analiz ta perspektyvy rozvytku burovuhil'noho kompleksu Oleksandriys'koho rehionu”, *Problemy zahal'noyi enerhetyky*, [Online], vol. 3, pp. 19-24, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2011_3_6.
5. Stefanik, Iu. V. (1990), *Geotekhnologiya nekonditsionnykh tverdykh topliv* [Geotechnology of substandard solid fuels], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
6. Bryk, D. Makitra, R. Kal'muk, S. (2011), “Vplyv svitovoyi enerhetychnoyi kryzy na perspektyvy protsesu hazyfikatsiyi vuhillya”, *Pratsi NTSh. Khem. Biokhem*, [Online], vol. 21, pp. 198-211, available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/74109/15-Bryk.pdf?sequence=1>.
7. Loktev, S. M., “Iskusstvennoe zhidkoe toplivo: proshloe, nastoiashchee, budushchee”, available at: <https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiR-sXhqdnLAhVpCpoKHURjAIMQFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ras.ru%2FFStorage%2Fdownload.aspx%3Fid%3D8a03637b-7447-4b00-ac7f-6dcab453c2ec&usq=AFQjCNH8IHDuhSke5EJwioZhIiyqi7IQ4w>
8. Mega-Carbon Company (USA), Robinson, Ken K., ”Reaction Engineering of Direct Coal Liquefaction”, available at: <https://doaj.org/article/dbe44af4afc248ef97f9a4085d62a8a0>
9. Winslow, J. and Schmetz, E., “Direct Coal Liquefaction Overview”, available at: http://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/ccbt/20090409_LTI_DCL-Presentation---Comprehensive-Overview.pdf
10. CONSOL Inc. Research & Development, Burke, F. P. and Winschel, R. A., “Recent advances and future prospects for direct coal liquefaction process development”, available at: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/42_1_SAN%20FRANCISCO_04-97_0313.pdf
11. Kong, Z., Dong, X. Xu, B. Li, R. Yin, Q. and Song, C., “EROI Analysis for Direct Coal Liquefaction without and with CCS: The Case of the Shenhua DCL Project in China”, *Energies*, [Online], available at: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/2/786>

12. Shenhua Group Corporation, Zhang, Y., "Shenhua Coal Conversion Technology and Industry Development", available at: https://gcep.stanford.edu/pdfs/wR5MezrJ2SJ6NfFI5sb5Jg/16_china_zhangyuzhuo.pdf.
13. IEA Clean Coal Centre, Minchener, A. J., "Coal-to-oil, gas and chemicals in China", available at: https://www.usea.org/sites/default/files/022011_Coal-to-oil,%20gas%20and%20chemicals%20in%20China_ccc181.pdf
14. UKRNEWS24, "Kitai i SShA podpisali programmu snizheniia urovnia vybrosov uglekislogo gaza", available at: <http://www.ukrnews24.net/kitaj-i-ssha-podpisali-programmu-snizheniya-urovnja-vybrossov-uglekislogo-gaza-569/>
15. New Energy and Industrial Technology Development Organization, "Clean Coal Technologies in Japan Technological Innovation in the Coal Industry", available at: <http://www.nedo.go.jp/english/>