

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра хімічних технологій та інженерії
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія
Форма навчання Заочна

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Стаднік Альони Юріївни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему Аналіз технологій виробництва синтетичних моторних
палив з вугілля та перспективність розвитку технологій

(повна назва теми)

за матеріалами Техніко – економічні показники роботи КХВ ПАТ
«АМКР»

(повна назва бази дослідження)

Науковий керівник к.т.н., доцент Десна Н.А.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 20__ р. № ____

Завідувач кафедри _____

(підпис)

Наук. ступінь, вчене звання Ініціали, прізвище

Кривий Ріг – 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
 Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Рівень вищої освіти бакалавр
 Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Хімічних технологій та інженерії
доцент, к.т.н.
Шмельцер К.О.
(підпис) (посада, вчене звання, прізвище, ініціали)
 « ____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Стаднік Альони Юріївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Аналіз технологій виробництва синтетичних моторних палив з вугілля та перспективність розвитку технологій

керівник кваліфікаційної роботи бакалавра Десна Наталя Анатоліївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу №228-ст від «6» квітня 2026 р.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2024

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи бакалавра Техніко-економічні показники роботи КХВ ПАТ «АМКР»

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Аналітична частина: Технологічні основи переробки вугілля на синтетичні рідкі палива. Аналіз технологій непрямого зрідження вугілля. Технології прямого зрідження вугілля: еволюція та сучасний стан. Фізико-хімічні основи прямої гідрогенізації. Еволюція технологій. Порівняльний аналіз прямої та непрямої конверсії вугілля. Екологічні аспекти та потенціал декарбонізації.

4.2 Основна частина: Передумови розвитку технологій переробки вугілля в рідкі палива. Технології виробництва синтетичних моторних палив з вугілля. Пряме гідрогенізаційне скраплення вугілля. Непряме скраплення: технологія Фішера-Тропша. Непряме скраплення: технологія метанол-бензин (MTG). Інноваційні та комбіновані технології. Порівняльний аналіз технологій та критерії порівняльної оцінки. Економічні аспекти впровадження технології.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Завданням графічний матеріал не передбачений

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	Десна Н.А., доцент		
2 Основна частина	Десна Н.А., доцент		

7. Дата видачі завдання «6» квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	12.05.26	
2.	Основна частина	26.05.26	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.26	
4.	Подання роботи до кафедри	01.06.26	
5.	Захист роботи в ЕК	17.06.26	

Здобувач

(підпис)

Стаднік А.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Десна Н.А.

(прізвище та ініціали)

*Примітка. Бланк друкується з обох сторін на одному аркуші.

АНОТАЦІЯ

Стаднік А.Ю. Аналіз технологій виробництва синтетичних моторних палив з вугілля та перспективність розвитку технологій – Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія». Державний університет економіки і технологій. Кривий Ріг, 2026.

Актуальність теми обумовлена тим, що світове енергоспоживання на 80,5 % базується на викопних видах палива, при цьому багато країн мають дефіцит нафти, але значні запаси вугілля. Технології переробки вугілля на синтетичні рідкі палива (Coal-to-Liquid, CTL) є стратегічним напрямом для забезпечення енергетичної незалежності, особливо в умовах посилення вимог до декарбонізації та екологічної безпеки. Метою кваліфікаційної роботи є комплексний аналіз сучасних CTL-технологій, оцінка їхніх техніко-економічних та екологічних показників, а також визначення перспективних напрямів розвитку. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання: вивчення фізико-хімічних основ прямого (DCL) та непрямого (ICL) зрідження вугілля, аналіз реакторних систем та каталітичних рішень, порівняння якісних характеристик отриманих моторних палив, оцінка екологічного профілю, вуглецевого сліду та економічної ефективності. Об'єктом дослідження є процеси термічної, каталітичної та гідрогенізаційної переробки вугілля на рідкі вуглеводневі фракції. Предметом дослідження – технологічні схеми, каталітичні системи, показники якості палив (цетанове число, вміст сірки, ароматичних сполук) та еколого-економічні параметри процесів DCL-1, DCL-2, COSP та ICL.

У роботі використано методи системного аналізу науково-технічної літератури та патентних джерел, порівняльного техніко-економічного аналізу, а також метод аналізу ієрархій (АНР) для багатокритеріального оцінювання та вибору оптимальних промислових рішень.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що технології другого покоління (DCL-2) забезпечують зниження споживання води на 29 %, енергії – на 31 %, викидів CO₂ – на 37 % порівняно з DCL-1 при виході рідких продуктів

до 65 %. Доведено, що непрямий синтез Фішера-Тропша (ICL) на кобальтових катализаторах дає дизельне пальне преміальної якості з цетановим числом 70–75, вмістом сірки ≤ 2 мг/кг та ароматичних сполук менше 3 %, однак має нижчий термічний ККД (46–50 %) і значно вищу вартість продукту порівняно з DCL-1. Революційним проривом 2025 року стало розроблення методу каталітичного придушення утворення CO_2 у FT-синтезі за допомогою бромметану в концентраціях на рівні мільйонних часток, що дозволяє знизити викиди вуглекислого газу з 30 % до менш ніж 1 % та підвищити селективність за олефіновими фракціями до приблизно 85 %. За результатами багатокритеріального оцінювання із застосуванням методу аналізу ієрархій оптимальною технологією визнано пряме гідрогенізаційне скраплення вугілля другого покоління (DCL-2), яка отримала інтегральний показник 8,15 за 10-бальною шкалою завдяки поєднанню високої вуглецевої ефективності, прийнятних капітальних витрат та кращих екологічних показників.

У розділі охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори для установок DCL-2: хімічний фактор (токсичні речовини – сірководень, бензол, фенол, оксид вуглецю), пожежо- та вибухонебезпека (водень під тиском до 15 МПа, легкозаймисті розчинники), термічний фактор (температури 420-450 °C) та фізичне навантаження (шум, вібрація). Розроблено заходи з техніки безпеки, що включають герметизацію обладнання з подвійними ущільненнями, безперервний газовий контроль (H_2 , CH_4 , CO) у вибухонебезпечних зонах, виконання електрообладнання у вибухозахищеному виконанні типів Ex d та Ex e, а також заземлення всього технологічного обладнання для відведення статичної електрики. Відповідно до нормативних документів, установки DCL-2 належать до категорії А за вибухопожежною небезпекою. Для захисту персоналу передбачено застосування фільтрувальних протигазів марок В та КД, ізолювальних дихальних апаратів, тепловідбивних костюмів, а також автоматичних систем пінного та водяного пожежогасіння з резервним джерелом живлення. Розроблені заходи повністю відповідають

вимогам чинних нормативних документів України (НПАОП, ДСТУ, ДСН, ДБН), що підтверджує можливість безпечної експлуатації такого виробництва.

Робота складається зі вступу, трьох розділів (аналітична частина, основна частина, охорона праці), висновків, списку використаних джерел (48 найменувань) та графічного матеріалу. Загальний обсяг пояснювальної записки становить 60 сторінок. Робота містить 10 таблиць та 7 рисунків (схеми реакторів Arge, SAS, Slurry-bed, газифікатора та реакторного блоку DCL-2). Ключові слова: синтетичні моторні палива, пряме зрідження вугілля (DCL), непряме зрідження (ICL), процес Фішера-Тропша, каталізатори (Fe, Co), цетанове число, викиди CO₂, DCL-2, охорона праці.

Ключові слова: вугілля, синтетичні рідкі палива, Coal-to-Liquid (CTL), пряме зрідження вугілля (DCL), непряме зрідження вугілля (ICL), процес Фішера–Тропша, каталізатори, цетанове число, викиди CO₂, декарбонізація, енергоефективність, DCL-2.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	12
1.1 Технологічні основи переробки вугілля на синтетичні рідкі палива.....	12
1.2 Аналіз технологій непрямого зрідження вугілля: процес Фішера-Тропша...	16
1.2.1 Структура та термодинаміка процесу Фішера-Тропша.....	16
1.2.2 Сучасні каталітичні системи та їхня оптимізація.....	18
1.3 Проривні дослідження: мінімізація CO ₂ -викидів у FT-синтезі.....	20
1.4 Технології прямого зрідження вугілля: еволюція та сучасний стан.....	21
1.5 Фізико-хімічні основи прямої гідрогенізації.....	21
1.6 Еволюція технологій DCL: від першого до другого покоління.....	22
1.7 Порівняльний аналіз прямої та непрямої конверсії вугілля.....	24
1.8 Екологічні аспекти та потенціал декарбонізації CTL.....	25
1.9 Економічна ефективність та фактори конкурентоспроможності.....	26
1.10 Перспективи розвитку CTL-технологій.....	27
ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	29
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА СИНТЕТИЧНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ З ВУГІЛЛЯ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ.....	29
2.1 Передумови розвитку технологій переробки вугілля в рідкі палива.....	29
2.2 Технології виробництва синтетичних моторних палив з вугілля.....	30
2.2.1 Пряме гідрогенізаційне скраплення вугілля.....	30
2.3 Непряме скраплення: технологія Фішера-Тропша.....	31
2.4 Непряме скраплення: технологія метанол-бензин (MTG).....	34
2.5 Інноваційні та комбіновані технології.....	34
2. 6 Порівняльний аналіз технологій.....	35
2.6. 1 Критерії порівняльної оцінки.....	35
2.7 Технологічні показники.....	36
2.8 Економічні аспекти.....	36
2.9 Екологічні аспекти та вуглецевий слід.....	37

2. 10 Обґрунтування вибору оптимальної технології.....	37
2.10. 1 Методика багатокритеріального вибору.....	37
2.10.2 Вибір та обґрунтування DCL-2 як оптимальної технології.....	37
2.11 Технологічні схеми та апаратурне оформлення процесів конверсії вугілля.....	38
2.11. 1 Теоретичні основи, хімізм та кінетика процесів ICL і DCL.....	38
2.11.2 Реакторні системи непрямого зрідження вугілля (ICL).....	40
2.11.3 Реакторний блок прямої гідрогенізації вугілля другого покоління (DCL-2).....	46
2.11.4 Порівняльний техніко-економічний аналіз продуктів.....	48
ОХОРОНА ПРАЦІ.....	51
3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	51
3.2 Заходи з техніки безпеки при експлуатації установок DCL-2.....	52
3.2.1 Вимоги до герметизації обладнання.....	52
3.2.2 Захист від вибухів водню та парів вуглеводнів.....	52
3.3 Промислова санітарія та гігієна праці.....	52
3.3.1 Контроль шкідливих речовин у повітрі робочої зони.....	53
3.3.2 Захист від теплового випромінювання.....	53
3.4 Пожежна безпека.....	53
3.4.1 Категорії вибухопожежної небезпеки.....	53
3.4.2 Системи пожежогасіння.....	54
3.5 Безпека при аварійних ситуаціях.....	55
3.5.1 Типові аварійні сценарії.....	55
3.5.2 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).....	55
3.6 Оцінка відповідності нормативним вимогам.....	55
ВИСНОВОК.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

ВСТУП

Світове енергетичне господарство в умовах XXI століття стикається з подвійним викликом: з одного боку, спостерігається неухильне зростання глобального попиту на рідкі моторні палива, з іншого – посилюються вимоги до декарбонізації та екологічної безпеки енергетичних систем. Станом на 2024 рік викопні види палива забезпечували близько 80,5% світового первинного енергоспоживання, причому частка нафти та природного газу в цьому балансі залишається домінуючою. Така структура енергопостачання створює стратегічну вразливість для країн, які не володіють достатніми власними запасами вуглеводнів.

Саме тому технології переробки вугілля – найпоширенішого мінерального палива у світі – на синтетичні рідкі палива (Coal-to-Liquid, CTL) привертають дедалі більшу увагу як на національному, так і на міжнародному рівнях. Технології CTL базуються на фундаментальному принципі перетворення твердого вуглецевмісного матеріалу на рідкі вуглеводні, що за своїми властивостями наближаються або навіть перевершують традиційні нафтопродукти. Впровадження та оптимізація промислових методів прямого й непрямого скраплення вугілля є критично важливими для стабілізації паливних ринків та забезпечення енергетичної незалежності держав. Пошук нових каталітичних рішень, мінімізація викидів вуглекислого газу та зниження питомого споживання енергоносіїв визначають вектор розвитку сучасної хімічної технології у цьому секторі.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є комплексний аналіз сучасних технологій виробництва синтетичних моторних палив з вугілля, оцінка їхніх техніко-економічних та екологічних показників, а також визначення перспективності розвитку технологічних схем прямої та непрямої конверсії сировини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Вивчити фізико-хімічні та технологічні основи процесів прямого (DCL)

та непрямого (ICL) зрідження вугільної маси.

2. Проаналізувати конструкційні особливості та схеми реакторних систем для синтезу Фішера-Тропша та гідрогенізації.

3. Дослідити вплив залізних та кобальтових каталітичних систем на селективність утворення цільових паливних фракцій та придушення побічних реакцій.

4. Провести порівняльну характеристику якісних експлуатаційні показників моторних палив, одержаних за різними технологічними схемами.

5. Оцінити екологічний профіль, вуглецевий слід та економічну ефективність впровадження схем STL першого та другого покоління.

Об'єктом дослідження є процеси термічної, каталітичної та гідрогенізаційної переробки вугілля на рідкі вуглеводневі фракції моторного призначення.

Предметом дослідження в свою чергу технологічні схеми реакторних вузлів, каталітичні системи, якісні показники отриманих палив (цетанове число, вміст сірки та ароматичних сполук) та еколого-економічні параметри процесів DCL-1, DCL-2, СОСР та ICL.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу науково-технічної літератури та патентних джерел, порівняльного техніко-економічного аналізу, метод аналізу ієрархій (АНР) для багатокритеріального оцінювання та вибору оптимальних промислових рішень.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічні основи переробки вугілля на синтетичні рідкі палива

Світове енергетичне господарство в умовах XXI століття стикається з подвійним викликом: з одного боку, спостерігається неухильне зростання глобального попиту на рідкі моторні палива, з іншого – посилюються вимоги до декарбонізації та екологічної безпеки енергетичних систем. Станом на 2024 рік викопні види палива забезпечували близько 80,5% світового первинного енергоспоживання, причому частка нафти та природного газу в цьому балансі залишається домінуючою. Така структура енергопостачання створює стратегічну вразливість для країн, які не володіють достатніми власними запасами вуглеводнів. Саме тому технології переробки вугілля – найпоширенішого мінерального палива у світі – на синтетичні рідкі палива (Coal-to-Liquid, CTL) привертають дедалі більшу увагу як на національному, так і на міжнародному рівнях.

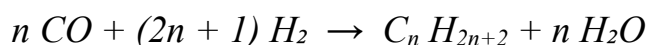
Технології CTL базуються на фундаментальному принципі перетворення твердого вуглецевмісного матеріалу на рідкі вуглеводні, що за своїми властивостями наближаються або навіть перевершують традиційні нафтопродукти. Історично становлення цих технологій пов'язане з періодами гострої нафтової кризи: найбільш ранні розробки було здійснено в Німеччині в 1920–1930-х роках, коли країна прагнула досягти паливної незалежності в умовах обмеженого доступу до нафтового капіталу. Пізніше, під час Другої світової війни, синтетичні палива забезпечували до 25% потреб німецької армії в пальному. У другій половині XX століття технологія була розвинена в Південно-Африканській Республіці корпорацією SASOL, яка й досі залишається одним із світових лідерів у цій галузі.

На сьогоднішній день технологічний ландшафт CTL представлений двома основними концептуальними підходами: прямою гідрогенізацією вугілля (Direct Coal Liquefaction, DCL) та непрямою каталітичною конверсією через стадію

синтез-газу – процесом Фішера-Тропша (Indirect Coal Liquefaction, ICL). Різниця між цими двома шляхами визначає не лише технологічні параметри процесів, але й якісні характеристики кінцевих продуктів, економічну ефективність та екологічний профіль виробництва.

Пряма гідрогенізація вугілля (DCL) передбачає безпосередню взаємодію вугільної маси з воднем за підвищених температур (400–470°C) і тиску (15–30 МПа) у присутності донорів водню та каталізаторів. У процесі цієї взаємодії відбувається деструкція складної органічної матриці вугілля – розриви слабких хімічних зв'язків, гідрогенізація ароматичних структур, видалення гетероатомів (сірки, азоту, кисню). Результатом є утворення рідкої суміші, яка після подальшої переробки може бути трансформована на моторні палива. Китайська корпорація Shenhua впровадила першу комерційну демонстраційну DCL-установку потужністю близько 1,08 млн тонн на рік, яка успішно експлуатується понад десятиліття.

Непряме зрідження вугілля (ICL) являє собою двостадійний процес. На першій стадії вугілля піддається газифікації – високотемпературній конверсії (1100–1400°C) у присутності пари та кисню з утворенням синтез-газу – суміші монооксиду вуглецю (CO) та водню (H₂). На другій стадії цей синтез-газ піддається каталітичній полімеризації в реакторах Фішера-Тропша, де молекули CO та H₂ поєднуються в довгі ланцюги вуглеводнів за реакцією:

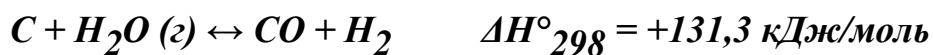
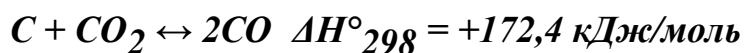


Саме цей підхід отримав значно більше поширення в сучасній промисловості завдяки своїй гнучкості – залежно від типу каталізатора (залізний або кобальтовий) та умов синтезу можна отримувати різні фракції вуглеводнів: від легких олефінів до важких парафінів і восків. Китайський промисловий комплекс Ningxia Coal Industry Group з річною продуктивністю 4 млн тонн є найбільшим у світі виробництвом рідких палив за технологією ICL.

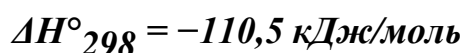
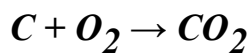
Промислова реалізація непрямого зрідження вугілля (схема ICL) базується на розчепленні високомолекулярної твердої структури палива до найпростіших газових компонентів (CO та H₂) з їх наступною спрямованою полімеризацією

[21]. Процес взаємодії вуглецю вугільної матриці з газифікуючими агентами протікає в гетерогенній системі «тверде тіло – газ» і визначається складною системою паралельних та послідовних оборотних ендотермічних та екзотермічних реакцій.

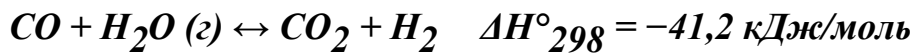
Основним лімітуючим етапом є взаємодія вуглецю з діоксидом вуглецю (реакція Будуара) та водяною парою (реакція газифікації). Обидві реакції характеризуються високими значеннями енергії активації ($E_a > 140$ кДж/моль), що обумовлює необхідність підтримання температури в реакційній зоні на рівні 1100–1500 °С для досягнення високої швидкості конверсії [21]. Рівноважні константи цих процесів суттєво залежать від тиску. Згідно з принципом Ле Шательє, підвищення загального тиску в системі зміщує рівновагу в бік вихідних речовин, оскільки реакції протікають зі збільшенням об'єму газу:



Для нівелювання термодинамічного гальмування при промислових тисках (4–8 МПа) використовують надлишок тепла, який генерується за рахунок екзотермічного гетерогенного горіння частини вугільної маси в потоці чистого кисню:



Важливу роль у формуванні остаточного складу синтез-газу (співвідношення H_2/CO) відіграє гомогенна реакція конверсії монооксиду вуглецю з водяною парою (Water-Gas Shift reaction – WGS), яка протікає без зміни об'єму газової фази:



Оскільки реакція WGS є екзотермічною, її константа рівноваги знижується із зростанням температури. У високотемпературних газифікаторах (понад 1300 °С) рівновага зміщена вліво, що призводить до одержання синтез-газу з низьким початковим модулем ($H_2/CO = 0,4-0,7$). Це вимагає додаткового стадіону кондиціювання газу або застосування залізних каталізаторів синтезу Фішера-Тропша, які самі по собі є активними в реакції WGS і здатні використовувати бідний на водень газ [22].

Якщо проаналізувати структурні відмінності між двома підходами, то можна виділити кілька ключових аспектів, наведених у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика технологій прямого та непрямого зрідження вугілля

Параметр	Пряма гідрогенізація (DCL)	Непряме зрідження (ICL/FT)
Кількість стадій	Одна (гідрогенізація)	Дві (газифікація + FT-синтез)
Температура процесу	400–470°C	1100–1400°C (газифікація); 200–350°C (FT)
Тиск	15–30 МПа	2–3 МПа (газифікація); 2–5 МПа (FT)
Ефективність конверсії вуглецю	50–70% (DCL-1); 70–75% (DCL-2)	35–50%
Вихід рідких продуктів на тонну вугілля	2,5–3,5 барелів	1,5–2,0 барелів
Якість дизельної фракції	Цетанове число ~45–50	Цетанове число 70–75
Основні переваги	Вища вуглецева ефективність	Гнучкість за сировиною, чистота продуктів
Основні недоліки	Високий тиск, жорсткі умови	Нижча загальна ефективність

Джерело розроблено за допомогою [1, 3]

З наведених даних видно, що пряме зрідження забезпечує вищу вуглецеву ефективність, однак продукти непрямого зрідження – особливо дизельні фракції – мають значно вищі експлуатаційні якості. Останнє пов'язане з тим, що FT-синтез дає лінійні парафінові вуглеводні без домішок сірки та азоту, тоді як продукти прямої гідрогенізації містять певну кількість ароматичних сполук, що знижують цетанове число.

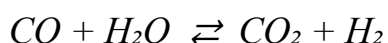
Розуміння цих базових технологічних відмінностей є необхідною передумовою для подальшого детального аналізу кожної з технологій, оцінки їхніх техніко-економічних показників та екологічних характеристик.

1.2 Аналіз технологій непрямого зрідження вугілля: процес Фішера-Тропша

1.2.1 Структура та термодинаміка процесу Фішера-Тропша

Процес Фішера-Тропша, незважаючи на свою багатовікову історію, залишається однією з найбільш динамічних сфер досліджень у сучасній хімічній технології. Це зумовлено не лише стратегічним значенням синтетичних палив, але й постійним пошуком нових каталітичних систем та реакторних рішень, здатних підвищити селективність, конверсію та знизити вуглецевий слід виробництва. У промисловому масштабі Індія, Китай, ПАР та деякі інші країни активно розвивають цей напрям, вкладаючи значні інвестиції у будівництво нових потужностей [1, 2].

Хімізм процесу Фішера-Тропша базується на каталітичній полімеризації мономерів – молекул CO та H₂ – у вуглеводневі ланцюги різної довжини. Загальна реакція утворення парафінів, наведена вище, є сумарною і не відображає складної мережі паралельних і послідовних перетворень, які реально відбуваються на поверхні каталізатора. Фактично, паралельно протікають реакції утворення олефінів, оксигенатів (спиртів, кислот), а також небажані процеси – насамперед реакція водяного газу (WGS, Water-Gas Shift):



Саме ця побічна реакція є джерелом значних викидів CO₂ на традиційних залізокаталітичних FT-виробництвах, де частка вуглецю синтез-газу, що перетворюється на CO₂, може досягати 18–35% [1]. Для кобальтових каталізаторів WGS-активність значно нижча, однак вартість кобальту обмежує його широке застосування.

Сучасна промислова реалізація FT-синтезу представлена трьома основними типами реакторних систем, кожна з яких має свої технологічні переваги та обмеження:

- **Реактори з нерухомим шаром каталізатора (Fixed-bed reactors)** є найбільш традиційним рішенням, яке використовується в процесах типу ARGE (німецька розробка, пізніше вдосконалена SASOL). У таких апаратах гранульований каталізатор розташований у вигляді стаціонарного шару, через який фільтрується газоподібний синтез-газ. Перевагами є відносна простота конструкції та легкість заміни каталізатора. Однак недоліком є складність відведення тепла – оскільки FT-синтез є сильно екзотермічним ($\Delta H \approx -165$ кДж/моль для утворення CН₂-ланки), локальний перегрів може призвести до дезактивації каталізатора та утворення небажаних легких фракцій.

- **Реактори з псевдозрідженим (киплячим) шаром (Fluidized-bed reactors)**, також відомі як реактори Synthol (розробка SASOL), використовують дрібнодисперсний каталізатор, який підтримується у зваженому стані висхідним потоком газу. Такі системи забезпечують значно кращий тепломасообмін, що дозволяє працювати при вищих температурах (300–350°C) та отримувати переважно низькомолекулярні олефіни та бензинові фракції. Саме високотемпературний FT-синтез на залізних каталізаторах у псевдозрідженому шарі забезпечує виробництво хімічних олефінів та високооктанового бензину.

- **Реактори суспензійного типу (колонного) – Slurry-bed reactors** – є найсучаснішим рішенням, що поєднує переваги високої теплопередачі рідкого середовища з можливістю роботи при низьких температурах (200–240°C). У таких реакторах дрібний каталізатор (типовий розмір 20–150 мкм) суспендований у рідких продуктах синтезу, які одночасно слугують

тепловідвідним середовищем. Газоподібний синтез-газ барботується через суспензію знизу догори, забезпечуючи інтенсивне перемішування та масообмін. Саме в реакторах такого типу досягаються найвищі виходи важких парафінових фракцій, які після гідрокрекінгу перетворюються на високоякіське дизельне пальне з цетанове число понад 70 [1, 5].

1.2.2 Сучасні каталітичні системи та їхня оптимізація

Ядром будь-якого FT-процесу є каталізатор, який визначає не тільки швидкість реакції, але й розподіл продуктів, енергоефективність та екологічні характеристики всього виробництва. На сьогодні промислове застосування знайшли два основних типу каталізаторів – залізні та кобальтові системи, кожна з яких має унікальні властивості.

Залізні каталізатори (Fe-Cu-K, Fe-Cu-SiO₂ та інші композиції) є найбільш поширеними у світовій FT-промисловості, займаючи приблизно дві третини ринку. Це зумовлено кількома факторами: відносно низькою вартістю заліза порівняно з кобальтом, високою толерантністю до домішок сірки в синтез-газі (хоча їх концентрація все ж має бути мінімізована), а також здатністю працювати в широкому діапазоні співвідношень H₂/CO [3]. Особливістю залізних каталізаторів є їхня висока WGS-активність, що в певних випадках може бути корисною для корекції складу синтез-газу (збільшення відношення H₂/CO), але водночас призводить до утворення значних кількостей CO₂. Типовий розподіл продуктів на залізному каталізаторі при низькотемпературному синтезі: парафіни (~50%), олефіни (~30%), оксигенати (~10%), CO₂ (~10–15%) [3, 5].

Кобальтові каталізатори (Co/ZrO₂, Co/SiO₂, Co/Al₂O₃) є альтернативою, що швидко розвивається, особливо для виробництва важких парафінових восків з подальшим гідрокрекінгом на дизель. Як показали експериментальні дослідження, кобальт-цирконієвий каталізатор (CoO-ZrO₂) у вигляді гранульованої композиції демонструє високу стабільність та селективність. При температурі 225–230°C та тиску 25–30 бар частка дизельної фракції в рідких продуктах становить 57,4–61,8%, а цетанове число отриманого пального досягає

72 при вмісті сірки менше 2 мг/кг та ароматичних вуглеводнів лише 3,2% [1, 5]. Такі показники значно перевершують вимоги стандартів на дизельне пальне Євро-5 та Євро-6, що відкриває перспективи використання синтетичного пального як високоякісної добавки або самостійного компонента.

Перевагами кобальтових систем є: (1) низька WGS-активність, що мінімізує утворення CO₂; (2) висока стійкість до дезактивації та тривалий термін експлуатації; (3) висока селективність за довголанцюговими парафінами (модель ASF – Anderson-Schulz-Flory з фактором росту $\alpha > 0,9$). Основним недоліком є чутливість до отруєння сіркою (на рівні ppb) та вища вартість кобальту, що змушують організовувати складні системи глибокого очищення синтез-газу.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика залізних та кобальтових каталізаторів FT-синтезу

Параметр	Залізні каталізатори	Кобальтові каталізатори
Вартість	Низька	Висока (приблизно в 100 разів вища за залізо)
Температура синтезу	200–350°C	200–240°C (для восків); 300–350°C (для легких продуктів)
Тиск	2–4 МПа	2–5 МПа
Співвідношення H ₂ /CO	0,5–1,5 (гнучкість)	2,0–2,2 (жорстка вимога)
WGS-активність	Висока	Дуже низька
Селективність за CO ₂	10–35%	1–5%
Стійкість до сірки	Помірна (до ~10 ppm)	Дуже низька (<1 ppm)
Продуктовий профіль	Олефіни, оксигенати, парафіни	Переважно н-парафіни
Типовий розмір частинок	20–150 мкм (суспензійні реактори)	30–200 мкм

Джерело розроблено за допомогою [3, 5]

1.3 Проривні дослідження: мінімізація CO₂-викидів у FT-синтезі

Однією з найбільш актуальних проблем, що стримувала розвиток CTL-технологій в умовах посилення кліматичних вимог, був високий вуглецевий слід процесу. Значний прогрес у цій сфері було досягнуто у 2025 році, коли міжнародна дослідницька група під керівництвом професора Мартіна (Пекінський університет) спільно з вченими з Інституту вугільної хімії (Шаньсі) опублікувала результати новаторського дослідження у журналі Science [8]. Їм вдалося розробити метод практично повного придушення утворення CO₂ на залізних FT-каталізаторах шляхом додавання слідових кількостей галогеновмісних сполук – зокрема бромметану (CH₃Br).

Механізм цього ефекту, як показали теоретичні та експериментальні дослідження, полягає в селективній адсорбції атомів бромю на поверхні залізних наночастинок. Бром блокує активні центри, на яких відбувається активація молекули води – перший крок реакції водяного газу. При цьому основні центри для активації CO та H₂ залишаються доступними, тому цільовий FT-синтез триває з високою швидкістю [8]. Експериментальні результати вражають: при концентрації CH₃Br близько 20 ppm (20 мільйонних часток) селективність за CO₂ знижується з традиційних 30% до менш ніж 1%. Паралельно спостерігається підвищення селективності за олефінами до ~85% (приблизно 85%) при відношенні олефінів до парафінів близько 13.

Для розуміння масштабу ефекту варто навести такі розрахунки. Типова промислова FT-установка продуктивністю 1 млн тонн рідких продуктів на рік при традиційній технології може викидати в атмосферу додатково від 0,5 до 1,5 млн тонн CO₂ на рік тільки за рахунок WGS-реакції (не враховуючи викидів, пов'язаних з виробництвом енергії для газифікації). Впровадження нової технології дозволить зменшити ці викиди на сотні тисяч тонн щорічно для кожного великого підприємства [3, 8].

Окрім екологічних переваг, нова технологія забезпечує економію вуглецевої сировини: оскільки вуглець не втрачається у вигляді CO₂, більша його

частка переходить у цільові рідкі продукти. В умовах, коли вартість вуглецю в рамках систем торгівлі викидами поступово зростає (в ЄС ціна на CO₂ у 2025 році досягла 80–100 євро за тону), цей фактор стає критичним для економічної життєздатності проектів.

На жаль, у доступних джерелах не наведено довгострокових досліджень стабільності каталізатора в присутності бромметану. Автори дослідження вказують, що відбувається адаптація поверхні та встановлення нового стаціонарного стану, однак термін ефективної роботи каталізатора без регенерації поки що не повідомляється [8]. Це питання потребує подальшого вивчення, оскільки в промислових умовах каталізатор повинен зберігати активність тисячі годин.

Компанія Synfuels China вже розпочала комерціалізацію цього технологічного рішення, що свідчить про високий потенціал його впровадження на діючих та нових CTL-потужностях у найближчі роки.

1.4 Технології прямого зрідження вугілля: еволюція та сучасний стан

Пряма гідрогенізація вугілля є альтернативним шляхом отримання синтетичних рідких палив, який вважається більш енергоефективним з точки зору конверсії вуглецевої сировини, але технологічно складнішим через жорсткі умови перебігу реакцій. В останні роки спостерігається значна еволюція цього підходу – від першого покоління технологій (DCL-1) до більш досконалих другого покоління (DCL-2) та інноваційних схем спільної переробки вугілля з нафтовими залишками (COCP – Coal-Oil Co-Processing).

1.5 Фізико-хімічні основи прямої гідрогенізації

Пряма гідрогенізація вугілля базується на здатності складних органічних полімерів – вугільних макромолекул – до деструкції під дією високої температури та водню. Структурно вугілля складається з конденсованих

ароматичних та гідроароматичних кілець, з'єднаних між собою відносно слабкими містками (атоми кисню, сірки, аліфатичні ланцюги). Процес гідрогенізації включає три основні стадії:

1. **Термічний крекінг** – розрив найбільш слабких містків (C–O, C–S, C–C аліфатичні) з утворенням вільних радикалів. Відбувається при температурах 350–450°C.

2. **Стабілізація радикалів воднем** – запобігання рекомбінації радикалів (що призвела б до утворення коксу) шляхом їх насичення атомарним воднем або воднем, що передається від молекул-донорів.

3. **Гідрогенізація ароматичних кілець** – насичення ненасичених зв'язків, що підвищує якість рідких продуктів та зменшує їхню схильність до утворення нагару при згорянні.

Процес потребує присутності каталізаторів (зазвичай на основі заліза, молібдену, кобальту, нікелю або їх комбінацій) та донорів водню – речовин, які полегшують перенесення водню до вугільної матриці. У сучасних DCL-схемах роль донора відіграють частково гідрогенізовані ароматичні сполуки (такі як тетралін), які циркулюють у системі.

1.6 Еволюція технологій DCL: від першого до другого покоління

Китай відіграє роль глобального лідера в розвитку технологій прямого зрідження вугілля. Уряд країни розглядає STL як стратегічний напрям для зниження залежності від імпорту нафти, який 2025 року досяг приблизно 73% [3]. Було створено та впроваджено дві генерації технологій, параметри яких суттєво відрізняються.

Перше покоління (DCL-1): представлене демонстраційним проектом Shenhua в Ордосі, що працює з 2008 року. Цей проект використовує залізний каталізатор, температуру 440–465°C та тиск 18–20 МПа. Проектна потужність становить 1,08 млн тонн рідких продуктів на рік, хоча фактична продуктивність може бути дещо нижчою через експлуатаційні обмеження [3]. Незважаючи на

успішну багаторічну роботу, технологія характеризується високою енергоємністю, значними викидами CO₂ та порівняно невисокою конверсією вугілля (~50–55%).

Друге покоління (DCL-2): розроблено в рамках проекту Shenhua Yulin Circular Economy Coal Comprehensive Utilization Project. Ключовими вдосконаленнями стали: (1) застосування більш активних нанодисперсних каталітичних систем, що дозволяють знизити тиск реакції до 12–15 МПа; (2) оптимізація рециркуляції донора водню, що зменшило споживання водню; (3) інтеграція теплових потоків між стадіями процесу [3].

Результати впровадження цих інновацій, підтверджені промисловими даними, є вражаючими. Порівняно з DCL-1, технологія DCL-2 демонструє зниження споживання води на 29,2%, енергоспоживання – на 31,0%, викидів CO₂ – на 37,2%, а інтегрального показника забруднення (за різними стоками та викидами) – на 22,3% [3]. При цьому на ефективність DCL-2 виявилася найвищою серед усіх досліджених CTL-технологій (DCL-1, DCL-2, СОСР) завдяки поєднанню високої конверсії, помірних капітальних витрат та прийняттого екологічного навантаження.

Таблиця 1.3

Порівняльні еколого-економічні показники технологій CTL (DCL-1 прийнято за 100%)

Показник	DCL-1	DCL-2	СОСР
Споживання води на тонну продукту	100%	↓ 29,2% (70,8%)	↓ 64,3% (35,7%)
Енергоспоживання на тонну продукту	100%	↓ 31,0% (69,0%)	↓ 15–20% (оцінка)
Викиди CO ₂ на тонну продукту	100%	↓ 37,2% (62,8%)	↓ 20–25% (оцінка)
Інтегральний показник забруднення	100%	↓ 22,3% (77,7%)	↓ 30–35% (оцінка)
Економічна ефективність (IRR)	8–10%	12–15%	6–8%
Капітальні витрати, \$/т продукту	100%	110–120%	70–80%

IRR – Internal Rate of Return (внутрішня норма доходності) – оцінка на основі аналізу чутливості. Оціночні дані, наведені згідно з [3].

Джерело розроблено за допомогою [3]

Технологія СОСР (спільна переробка вугілля з нафтовими залишками) є окремим інноваційним напрямом, де до 30–50% органічної сировини становлять гудрони, важкі смоли або інші низькоякісні нафтові фракції. Спільна переробка дозволяє використовувати синергійні ефекти: рідка нафтова фаза виступає одночасно як розчинник, як донор водню та як середовище, що полегшує транспортування вугільних частинок. Це дає змогу знизити тиск процесу до 6–10 МПа та значно (до 64%) скоротити споживання води [3]. Однак СОСР поки що має гіршу економіку порівняно з DCL-2 через потребу в безперебійному постачанні нафтових залишків та вищу складність управління якістю продукту. Тим не менш, для регіонів, де нафтопереробні заводи виробляють значні кількості важких залишків, СОСР може бути привабливою альтернативою.

1.7 Порівняльний аналіз прямої та непрямой конверсії вугілля

З точки зорів виробництва моторних палив, пряма та непряма конверсія вугілля мають комплементарні переваги. DCL забезпечує вищий сумарний вихід рідких продуктів на тону вугілля, що робить його більш привабливим для масштабної заміни нафтопродуктів. Однак якість DCL-продуктів поступається FT-продуктам: дизельні фракції містять до 20–30% ароматики та мають цетанове число на рівні 45–50, що вимагає подальшої глибокої гідрогенізації. FT-дизель майже не містить сірки та ароматики (менше 3–4%) і має цетанове число 70–75, що перевищує найжорсткіші сучасні стандарти [1, 3].

1.8 Екологічні аспекти та потенціал декарбонізації СТЛ

Попри очевидні переваги СТЛ-технологій для енергетичної безпеки, питання екологічної прийнятності цих виробництв тривалий час залишалося дискусійним. Дійсно, будь-який процес глибокої переробки вугілля пов'язаний з викидами парникових газів (насамперед CO_2) та інших забруднювачів (SO_2 , NO_x , пил, важкі метали). Однак, як свідчать сучасні дослідження, технологічний прогрес дозволяє послідовно знижувати екологічне навантаження. Важливим аргументом є те, що СТЛ дозволяє централізувати забруднення та ефективно контролювати його за допомогою промислових фільтрів та систем очищення, на відміну від спалювання вугілля в розподілених джерелах (побутові котельні, дрібні ТЕЦ).

Вуглецевий слід СТЛ-палива значно перевищує показники традиційного нафтового палива при зіставленні "well-to-wheel" (від видобутку до коліс), якщо не вживати заходів з уловлювання CO_2 . За оцінками, DCL-1 генерує приблизно вдвічі більше CO_2 , ніж виробництво та спалювання звичайного дизеля [3]. Однак існують технологічні рішення, здатні кардинально змінити ситуацію:

- **Уловлювання та зберігання CO_2 (Carbon Capture and Storage, CCS)** – впровадження блоків попереднього згоряння (pre-combustion capture) на стадії газифікації дозволяє видаляти CO_2 з синтез-газу до FT-синтезу. Комбінація ICL із CCS потенційно знижує викиди парникових газів на 24–49% [3]. Спроектований розподіл CO_2 за стадіями ICL (відповідно до балансу) показує, що більша частина CO_2 утворюється саме на стадії газифікації, що створює зручну точку для його уловлювання.

- **Використання "зеленого" водню** – заміна водню, отриманого з викопної сировини (наприклад, паровим реформінгом метану), на водень з електролізу води від поновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової, гідро- або атомної) може різко знизити вуглецевий слід СТЛ-продуктів. Інтеграція високотемпературних електролізерів (Co-SOEC) з FT-синтезом (так званий Power-to-Liquid підхід) дозволяє досягти зниження енергоспоживання на 16–37%

завдяки ефективному тепловому зв'язку між ендотермічним електролізом та екзотермічним FT-синтезом [4].

- **Каталітичне придушення CO₂** – вищеописана технологія використання бромметанових добавок знижує емісію CO₂ на FT-стадії з 30% до <1%, фактично ліквідуючи це джерело викидів [8].

Комплексне застосування цих трьох підходів (CCS + зелений H₂ + придушення WGS) здатне, за попередніми оцінками, зробити CTL-паливо нейтральним або навіть вуглецево-негативним (якщо CO₂ не викидається, а закачується у підземні сховища та враховується у відповідних системах квотування). Це створює перспективу для CTL стати "зеленим" джерелом синтетичних палив, які можуть замінити нафтові без зміни існуючої інфраструктури транспорту та зберігання.

Споживання води є ще одним критичним аспектом, особливо в регіонах з дефіцитом водних ресурсів (наприклад, на півночі Китаю, в пустелях Індії). Як видно з таблиці 3.3, нові технології дозволяють різко (на 29–64%) скоротити використання води. СОСР демонструє найкращі показники, знижуючи водоспоживання майже на дві третини порівняно з DCL-1 [3].

1.9 Економічна ефективність та фактори конкурентоспроможності

Економіка CTL-проектів визначається кількома ключовими факторами, які можуть різко відрізнитися залежно від географічного розташування, рівня технології та макроекономічної кон'юнктури.

Основним стримуючим фактором є капітальні витрати (CAPEX). CTL-заводи є одними з найдорожчих у хімічній промисловості. За оцінками, будівництво установки потужністю 3-4 млн тонн рідких продуктів на рік може коштувати від 10 до 20 млрд доларів США, залежно від складності технологічної схеми та вартості будівельно-монтажних робіт в конкретному регіоні. Такі інвестиції вимагають тривалого періоду окупності та стабільного цінового середовища на нафту.

Поточні витрати (ОРЕХ) включають вартість вугілля (в середньому 20–40% від ОРЕХ), водню та каталізаторів. Нижча вартість вугілля порівняно з нафтою є головною конкурентною перевагою СТЛ. Технології DCL-2 та СОСР дозволяють знизити енергоспоживання та підвищити ефективність, тим самим покращуючи економіку.

Точка беззбитковості для СТЛ-проектів різних поколінь оцінюється таким чином:

- DCL-1: рентабельна при ціні нафти > 80–90 дол./бар. (без врахування квот на CO₂).
- DCL-2: точка беззбитковості знижується до 60–70 дол./бар. завдяки вищій ефективності [3].
- ICL (FT) з інтеграцією CCS та новими каталізаторами: приблизно 75–85 дол./бар.

Варто враховувати, що для країн-імпортерів нафти (Індія, Китай) економічний ефект від СТЛ визначається не тільки прямими витратами, але й макроекономічними вигодами: зменшенням імпоротної залежності, створенням робочих місць (до 50 000 робочих місць на 25 проектів в Індії [6]), технологічним розвитком регіонів.

Індійський уряд в 2026 році затвердив програму стимулювання коалігазифікації обсягом 3,9 млрд дол. США (375 млрд ₹), що передбачає покриття до 20% капітальних витрат проектів. Така підтримка є критично важливою для подолання високого порогу входження в індустрію [2, 6].

1.10 Перспективи розвитку СТЛ-технологій

На основі проведеного аналізу можна виділити кілька ключових трендів, які визначатимуть розвиток СТЛ-технологій у найближчі 10–15 років.

1. Розвиток гібридних схем Coal-Biomass-to-Liquid (CBTL). Додавання біомаси (деревина, відходи сільського господарства, мікробродорості) до вугільної шихти дозволяє зменшити вуглецевий слід кінцевого палива та

покращити його властивості. Сумісна газифікація вугілля та біомаси може забезпечити вихід синтез-газу з більш сприятливим співвідношенням H_2/CO , ніж у разі використання чистого вугілля [7].

2. Інтеграція з електрохімічними технологіями (Power-to-Liquid).

Сполучення високотемпературного електролізу (Co-SOEC) з FT-синтезом в одному технологічному ланцюзі дозволяє використовувати надлишкову "зелену" електроенергію для виробництва синтез-газу, а потім – рідких палив. Такий підхід забезпечує найвищу гнучкість та мінімальний вуглецевий слід, оскільки водень отримується з води без викидів CO_2 [4].

3. Розвиток когенерації та каскадного використання тепла.

FT-синтез генерує значну кількість тепла (близько 25% від нижчої теплоти згоряння синтез-газу), яке може бути використане для потреб самого заводу (виробництво пари, електроенергії) або для опалення прилеглих територій. Підвищення загальної енергетичної ефективності CTL-комплексу до 55–60% є реальним завданням.

4. Впровадження малих модульних реакторів FT-синтезу.

Традиційні FT-установки – це гігантські реактори, що потребують величезних капіталовкладень. Розробка модульних, стандартизованих реакторів меншої потужності (наприклад, 10–20 тисяч тонн на рік) дозволить знизити бар'єри входження та розширити географію CTL-проектів, роблячи їх доступними для регіональних підприємств.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА СИНТЕТИЧНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ З ВУГІЛЛЯ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ

2.1 Передумови розвитку технологій переробки вугілля в рідкі палива

Світовий енергетичний ландшафт зазнає глибоких трансформацій під впливом кліматичних змін та викликів енергетичної безпеки. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році частка викопних видів палива у світовому споживанні первинної енергії становитиме 80,5%, причому внесок невикопних джерел дещо перевищить 19,5% [9]. Вугілля залишається одним із найпоширеніших енергетичних ресурсів, що становить близько 27% світового споживання первинної енергії [10]. Для країн з обмеженими запасами нафти, але значними вугільними ресурсами, технології перетворення вугілля на рідке паливо (Coal-to-Liquid, CTL) є стратегічно важливим напрямом забезпечення енергетичної незалежності.

Проблема структурного дисбалансу енергозабезпечення особливо гостро стоїть перед Китаєм, де залежність від імпорту нафти досягла 73%, а споживання вугілля продовжує зростати на 3,5% щорічно [11]. Світовий попит на нафту, за прогнозами, зростатиме до 2030 року, досягаючи майже 110 млн барелів на день [12]. У цьому контексті розвиток технологій виробництва рідких палив з вугілля набуває особливого значення для країн, що прагнуть зменшити енергетичну залежність.

Історично технології переробки вугілля в рідкі палива розвивалися у відповідь на кризові ситуації в нафтозабезпеченні. Промислова розробка цих технологій розпочалася в Німеччині під час Другої світової війни, а пізніше отримала розвиток у Південно-Африканській Республіці в період апартеїду, коли компанія SASOL налагодила комерційне виробництво синтетичного палива з вугілля за технологією Фішера-Тропша [13]. Сьогодні Китай є світовим лідером

у впровадженні CTL-технологій: загальна потужність завершених або споруджуваних проектів перевищує 12 млн тонн на рік [14].

2.2 Технології виробництва синтетичних моторних палив з вугілля

Усі існуючі технології виробництва рідких палив з вугілля можна класифікувати на дві основні категорії: пряме гідрогенізаційне скраплення (Direct Coal Liquefaction, DCL) та непряме скраплення (Indirect Coal Liquefaction, ICL), яке передбачає попередню газифікацію вугілля з отриманням синтез-газу та подальший його каталітичний синтез [15].

2.2.1 Пряме гідрогенізаційне скраплення вугілля

Пряме скраплення вугілля (DCL) є процесом, за якого вугільна макромолекула руйнується під впливом високої температури та тиску в присутності водню. Процес відбувається за участю водень-донорних розчинників та каталізаторів, що забезпечують гідрогенізацію та розщеплення складних вугільних структур [16].

Принципова схема процесу. У типових процесах прямого скраплення вугілля попередньо подрібнюється та змішується з рециркульованим розчинником (який виконує роль донора водню) та каталізатором. Отримана суспензія подається в реактор високого тиску (типові умови: температура 400-470°C, тиск 10-20 МПа), де відбувається гідрокрекінг вугільної речовини. Продукти реакції піддаються сепарації, після чого залишковий кокс (асфальтени) може бути використаний для отримання додаткового водню [17].

Еволюція технологій прямого скраплення. Розвиток DCL-технологій пройшов кілька етапів удосконалення. Перше покоління (DCL-1) включає такі процеси, як Solvent Refined Coal (SRC-I, SRC-II), Exxon Donor Solvent (EDS), H-Coal. Ці технології використовували одностадійні реактори та характеризувалися відносно низькою ефективністю [18]. Друге покоління (DCL-2) – каталітичне двостадійне скраплення (Catalytic Two-Stage Liquefaction, CTSL), яке забезпечує

вищу конверсію вугілля (до 90%) та вихід рідких продуктів завдяки орієнтації на оптимальні умови на кожній стадії. Інноваційні розробки включають технологію Wave Liquefaction™, що поєднує мікрохвильовий піроліз та іонізацію газів [11].

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика технологій прямого скраплення вугілля

Параметр	DCL-1 (Shenhua)	DCL-2	Wave Liquefaction™
Температура, °C	440-460	420-450	>1000 (швидкісний)
Тиск, МПа	17-19	12-15	атмосферний
Каталізатор	Залізний	Удосконалений залізний	Не потребує
Конверсія, %	~85-90	>90	>95
Вихід рідини, %	50-55	60-65	50-65
Споживання H ₂	Високе	Помірне	Низьке

Джерело розроблено за допомогою [8; 9; 11]

2.3 Непряме скраплення: технологія Фішера-Тропша

Непряме скраплення вугілля (ICL) є двостадійним процесом, що включає газифікацію вугілля з отриманням синтез-газу (суміш CO та H₂) та подальший каталітичний синтез рідких вуглеводнів за методом Фішера-Тропша (Fischer-Tropsch Synthesis, FTS) [20].

Газифікація вугілля. Перший етап передбачає перетворення вугілля на синтез-газ шляхом парокисневої газифікації. Для цього використовуються різноманітні конструкції газифікаторів, серед яких найбільш поширеними є газифікатори Lurgi (із щільним шаром), Shell та GE/Техасо (енергетичні, з потоковим транспортом). Отриманий синтез-газ піддається глибокому

очищенню від сірководню, органічної сірки та інших отрут каталізатора [21].

Залежно від гідродинамічного режиму та способу організації контакту фаз промислові газифікатори поділяють на три основні класи: з щільним (затиснутим) шаром, з киплячим (флюїдизованим) шаром та з потоком, що захоплюється (entrained flow) [21]. Найбільш перспективними для масштабних комплексів непрямого зрідження вугілля (CTL) є системи з захопленим потоком завдяки їхній високій питомій продуктивності та здатності переробляти будь-які типи вугілля, включаючи спікливості марки.

Промисловий газифікатор типу Shell або E-Gas (рисунок 2.1) працює за температури 1400–1600 °С та тиску до 5 МПа. Вугільний пил транспортується в апарат за допомогою азоту або діоксиду вуглецю. За таких температур час перебування частинок у реакційній зоні становить лише кілька секунд, проте конверсія вуглецю досягає 99%. Внутрішня поверхня газифікатора захищена спеціальною мембранною стіною (Water Wall), по якій стікає рідкий мінеральний шлак, утворюючи гарнісажний захисний шар, що запобігає термічній ерозії корпусу апарата [21].



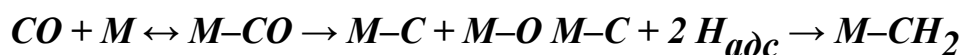
Рисунок 2.1- Структурна схема газифікатора високого тиску із захопленням

Джерело розроблено за допомогою інтернет ресурсу на основі [21]

Синтез Фішера-Тропша. Реакція Фішера-Тропша є полімеризаційним процесом, що каталізується металами VIII групи (переважно залізом або кобальтом), в результаті якого молекули CO та H_2 перетворюються на лінійні парафіни, олефіни та кисневмісні сполуки [22]. Залежно від умов проведення процесу, виділяють низькотемпературний синтез (180-250°C) – продукує переважно довголанцюгові парафінові воски, та високотемпературний синтез (300-350°C) – забезпечує утворення легких олефінів та бензинових фракцій [23].

Синтез Фішера-Тропша являє собою класичний приклад відновлювальної олігомеризації монооксиду вуглецю воднем на поверхні перехідних металів (Fe, Co, Ru). Механізм реакції включає кілька послідовних стадій: хімосорбцію вихідних компонентів, руйнування зв'язку C–O, ініціювання ланцюга (утворення первинного метиленового радикалу), його ріст (реакція впровадження) та обрив із десорбцією молекули продукту [22].

Сучасні уявлення про хімізм процесу базуються на карбідному та оксигенатному механізмах. Згідно з карбідною теорією, молекула CO адсорбується на активному центрі металу (M) з подальшим дисоціативним розщепленням зв'язку між вуглецем і киснем. Утворений поверхневий карбід металу швидко гідрується воднем до метиленових груп:



Метиленові радикали $M-CH_2$ виступають мономерними одиницями. Ріст ланцюга відбувається шляхом міграційного впровадження мономера за зв'язком метал–алкіл. Обрив ланцюга здійснюється за двома основними напрямками: спонтанним β -елімінуванням водню з утворенням α -олефінів або кінцевим гідруванням алкільного радикалу до стабільного алкану (н-парафіну) [22, 23].

Математичний опис фракційного розподілу продуктів здійснюється за

допомогою статистичного рівняння Андерсона-Шульца-Флорі (ASF). Проте реальний розподіл продуктів промислового синтезу часто демонструє відхилення від ідеальної моделі ASF. Зокрема, спостерігається підвищений вихід метану (C_1) та занижений вихід етану (C_2). Це пояснюється високою рухливістю первинних метилових радикалів на поверхні та вторинними реакціями перетворення етилену (його повторною адсорбцією та включенням у ланцюг) [23].

2.4 Непряме скраплення: технологія метанол-бензин (MTG)

Альтернативним маршрутом непрямого скраплення є технологія перетворення метанолу на бензин (Methanol-to-Gasoline, MTG), розроблена компанією Mobil Oil [24]. Процес складається з трьох основних етапів: газифікація вугілля та отримання синтез-газу; синтез метанолу з синтез-газу (тиск 5-10 МПа, температура 200-300°C, мідь-цинк-алюмінієвий каталізатор); перетворення метанолу на вуглеводні на цеолітному каталізаторі ZSM-5. Комерційний завод за цією технологією експлуатувався у Новій Зеландії в 1980-х роках [25].

2.5 Інноваційні та комбіновані технології

Спільна переробка вугілля та біомаси (Coal-Oil Co-processing, COCP).

Ця технологія передбачає сумісну переробку вугілля з біомасою або нафтовими залишками, що забезпечує синергетичний ефект завдяки вищому вмісту водню в біомасі. Показано, що COCP дозволяє збільшити вихід рідини з ~50% до понад 75% при конверсії вугілля до 90% [26].

Технологія Wave Liquefaction™. Розроблена компанією H Quest Vanguard інноваційна технологія прямого скраплення, що поєднує низькоенергетичну іонізацію газу та швидкісний мікрохвильовий піроліз. Особливістю є надзвичайно швидке нагрівання твердих частинок вугілля до

температур понад 1000°C упродовж 100 мілісекунд [19].

Інтеграція з уловлюванням та зберіганням вуглецю (CCS). Для зниження викидів CO₂ пропонується інтеграція з системами CCS. Залежно від джерела водню можна досягти скорочення викидів на 24-49% при помірному збільшенні вартості [19].

2. 6 Порівняльний аналіз технологій

2.6. 1 Критерії порівняльної оцінки

Для обґрунтованого вибору оптимальної технології виробництва синтетичних моторних палив з вугілля застосовано комплекс критеріїв, що охоплюють технологічні, економічні та екологічні аспекти. У табл. 2 наведено систему критеріїв, використаних у даному дослідженні.

Таблиця 2.2

Система критеріїв для порівняльного аналізу CTL-технологій

Група критеріїв	Показник	Одиниця вимірювання
Технологічні	Термічний ККД	%
	Конверсія вуглецю	%
	Вихід рідких продуктів	% (daf)
Економічні	Капітальні витрати	\$/бар.
	Точка беззбитковості	\$/бар. Нафти
Екологічні	Викиди CO ₂ (life-cycle)	т CO ₂ /т продукту
	Споживання води	м ³ /т продукту

Джерело: розроблено за допомогою [11; 15; 21]

2.7 Технологічні показники

Результати порівняння технологічних показників різних CTL-технологій свідчать про суттєві відмінності в ефективності. Найвищий термічний ККД демонструє технологія перетворення вугілля на метанол (до 66%), однак при орієнтації на максимальний вихід рідких продуктів процес MTG забезпечує ККД близько 49% при виході рідини 46,5%, тоді як для FTS цей показник становить лише 37% [28].

У табл. 3 наведено зведені техніко-економічні показники для основних технологій.

Таблиця 2.3

Порівняльні показники CTL-технологій

Показник	DCL-1	DCL-2	FTS	MTG	СОСР
Термічний ККД (рідка фаза), %	45-50	55-60	37-45	46-53	50-55
Конверсія вуглецю, %	85-88	>90	>95*	>95*	88-92
Вихід рідини (daf), %	50-55	60-65	40-45**	48-53	>75
Споживання води, м ³ /т	6-8	4-6	8-12	7-10	2-3
Викиди CO ₂ (LCA), т/т	~5,8	~3,6	~5,0	~4,5	~4,0
Відносна вартість продукту	1,0	0,85	2,0	1,5	0,95

Джерело: розроблено за допомогою [11; 8; 20; 21]

2.8 Економічні аспекти

Економічна доцільність впровадження CTL-технологій суттєво залежить від світових цін на нафту та доступності сировини. Аналіз літературних даних свідчить, що точка беззбитковості для різних технологій знаходиться в діапазоні 60-100 \$ за барель нафти [29]. Найбільш чутливим до ціни нафти є FTS-процес, який за оцінками має вартість продукту в 2,0 раза вищу порівняно з DCL-

1. Найекономічнішою серед розглянутих є технологія DCL-2, яка забезпечує найкращі економічні показники поряд із суттєвим зниженням екологічного навантаження [27].

2.9 Екологічні аспекти та вуглецевий слід

Екологічна прийнятність CTL-технологій залишається предметом активних дискусій через високі рівні викидів парникових газів та значне споживання води. Оцінка життєвого циклу показує, що викиди CO₂ для DCL-1 становлять близько 5,8 т на тону продукту, що приблизно вдвічі перевищує показники традиційного нафтоперероблення [27]. Застосування CCS дозволяє скоротити викиди на 24-49% [30]. Використання біомаси як півсировини забезпечує зниження життєвого циклу викидів CO₂ на 22% [26].

2. 10 Обґрунтування вибору оптимальної технології

2.10. 1 Методика багатокритеріального вибору

Для вибору оптимальної технології виробництва синтетичних моторних палив з вугілля застосовано метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНР), що дозволяє врахувати багатокритеріальність проблеми. На основі аналізу літератури [3; 7; 19] та нормативних вимог до сталої енергетики, визначено наступні вагові коефіцієнти критеріїв:

- Економічні показники – 0,35;
- Викиди парникових газів – 0,25;
- Вихід цільових продуктів – 0,15;
- Споживання води – 0,15;
- Технологічна готовність (TRL) – 0,10.

2.10.2 Вибір та обґрунтування DCL-2 як оптимальної технології

На основі якого багатокритеріального аналізу, як оптимальна технологія

для подальшого дослідження обрано пряме гідрогенізаційне скраплення вугілля другого покоління (DCL-2). Даний вибір обґрунтовується наступними ключовими факторами.

Найвища загальна ефективність. DCL-2 демонструє найкраще співвідношення технологічних, економічних та екологічних показників. Скорочення енергоспоживання на 31%, викидів CO_2 на 37% та водоспоживання на 29% порівняно з DCL-1 [27] робить цю технологію найбільш перспективною з точки зору сталого розвитку.

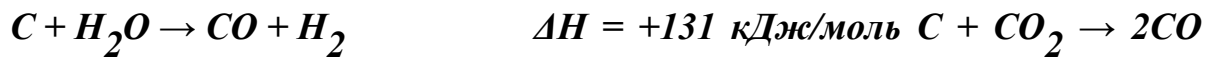
Економічна конкурентоспроможність. При помірних цінах на нафту (\$60-80/бар.) DCL-2 забезпечує позитивну економічну віддачу завдяки вищому виходу рідких продуктів (60-65% daf) та нижчим питомим капітальним витратам порівняно з ICL [24].

Потенціал подальшого вдосконалення. Використання каталізаторів нового покоління, оптимізованих режимів роботи (нижчий тиск 12-15 МПа) та інтеграція з відновлюваними джерелами водню залишають значний простір для підвищення ефективності [27].

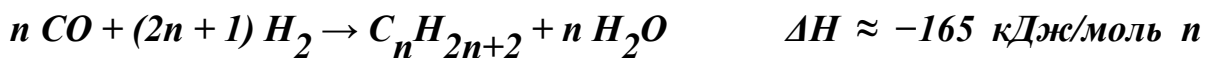
2.11 Технологічні схеми та апаратурне оформлення процесів конверсії вугілля

2.11.1 Теоретичні основи, хімізм та кінетика процесів ICL і DCL

Промислова реалізація непрямого зрідження вугілля (схема ICL) базується на концепції двостадійного перетворення: первинної газифікації твердого палива з отриманням очищеного синтез-газу ($\text{CO} + \text{H}_2$) та його наступної каталітичної конверсії у рідкі вуглеводні за методом Фішера-Тропша [5, 21]. Процес газифікації включає складну гетерогенну взаємодію твердого вуглецю вугілля з газифікуючими агентами ($\text{O}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2$) за високих температур (1000–1500 °C) та тиску до 4–8 МПа. Основні хімічні реакції газифікаційної стадії описуються такими рівняннями:



Одержаний сирий газ піддається глибокому очищенню від сірчистих сполук (H_2S , COS), азотовмісних речовин та смол до залишкового вмісту менше $0,1 \text{ мг/м}^3$, оскільки каталізатори синтезу Фішера-Тропша надзвичайно чутливі до отруєння [22]. Хімізм безпосереднього синтезу рідких вуглеводнів з очищеного синтез-газу являє собою гетерогенно-каталітичну реакцію полімеризації метиленових радикалів, що утворюються при гідруванні адсорбованого монооксиду вуглецю:



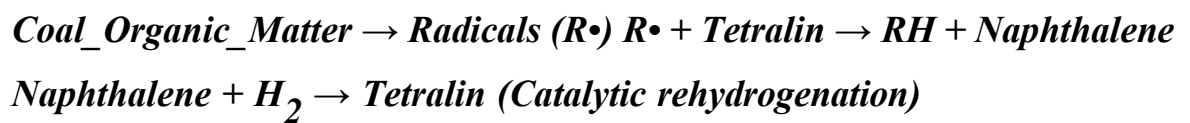
Процес є сильно екзотермічним. Ефективне відведення тепла визначає тип реакторного обладнання та стабільність каталізатора. Кінетичний розподіл продуктів за довжиною вуглеводневого ланцюга описується математичною моделлю Андерсона-Шульца-Флорі (ASF) [23]:

$$W_n / n = (1 - \alpha)^2 \cdot \alpha^{n-1}$$

де W_n – масова частка вуглеводню з числом атомів вуглецю n ; α – ймовірність росту ланцюга. Величина α залежить від природи металу каталізатора, температури та парціального тиску компонентів. На кобальтових каталізаторах ($\alpha = 0,85-0,94$) за низьких температур (LTFT, $200-240 \text{ }^\circ\text{C}$) утворюються переважно важкі парафіни (віск), які згодом піддають гідрокрекінгу з отриманням дизельного пального. На залізних каталізаторах за

високих температур (НТФТ, 320–350 °С) величина α знижується до 0,65–0,75, що зміщує селективність у бік легких олефінів та бензинових фракцій [22, 23].

При прямому зрідженні вугілля (схема DCL) перетворення відбувається шляхом руйнування макромолекулярної структури твердого вугілля під дією тепла і водню в присутності пастоутворювача – розчинника-донора водню (наприклад, тетраліну) та каталізаторів. Хімізм DCL включає стадію термічного розчинення (деструкції) з утворенням реакційноздатних радикалів та їх наступне стабілізуюче гідрування [8]:



У технологіях DCL першого покоління (DCL-1) процес проводили за екстремальних умов (тиск 30–70 МПа, температура 450–470 °С, грубодисперсний залізний шлам). Сучасні технології другого покоління (DCL-2) використовують високоефективні нанодисперсні або розчинні каталізатори на основі сполук заліза та молібдену, що дозволяє знизити робочий тиск до 14–15 МПа та суттєво підвищити селективність утворення рідких фракцій [8, 17].

2.11.2 Реакторні системи непрямого зрідження вугілля (ICL)

Сучасне апаратне оформлення непрямого скраплення вугілля включає блок високотемпературної газифікації та блок реакторів синтезу Фішера-Тропша. Для забезпечення максимальної питомої продуктивності та чистоти синтез-газу застосовують газифікатори з потоком, що захоплюється (Entrained-flow gasifier). Принципову схему такого промислового апарату типу Shell/E-Gas наведено на рисунку 2.2 [21].



Примітка: Температурні режими та склад газу залежать від виду палива, конструкції та режимів роботи установки.

Рисунок 2. 2 – Принципова схема багаступеневої газогенераторної установки

Джерело розроблено за допомогою інтернет ресурсу на основі [21]

Тонкоподрібнене вугілля разом із киснем та водяною парою подається через пальникові пристрої безпосередньо в реакційну зону газифікатора. Завдяки високій температурі (1400–1550 °C) мінеральна частина вугілля плавиться і стікає по внутрішніх мембранних стінах у вигляді рідкого шлаку, а отриманий газ практично не містить вищих вуглеводнів, фенолів та смол, що спрощує його подальше очищення [21].

Для низькотемпературного синтезу Фішера-Тропша (LTFT), орієнтованого на отримання парафінового воску та дизельного пального, тривалий час стандартом виступав трубчастий реактор із нерухомим шаром каталізатора (Fixed-bed Arge reactor). Його схему представлено на рисунку 2.3 [12, 23].

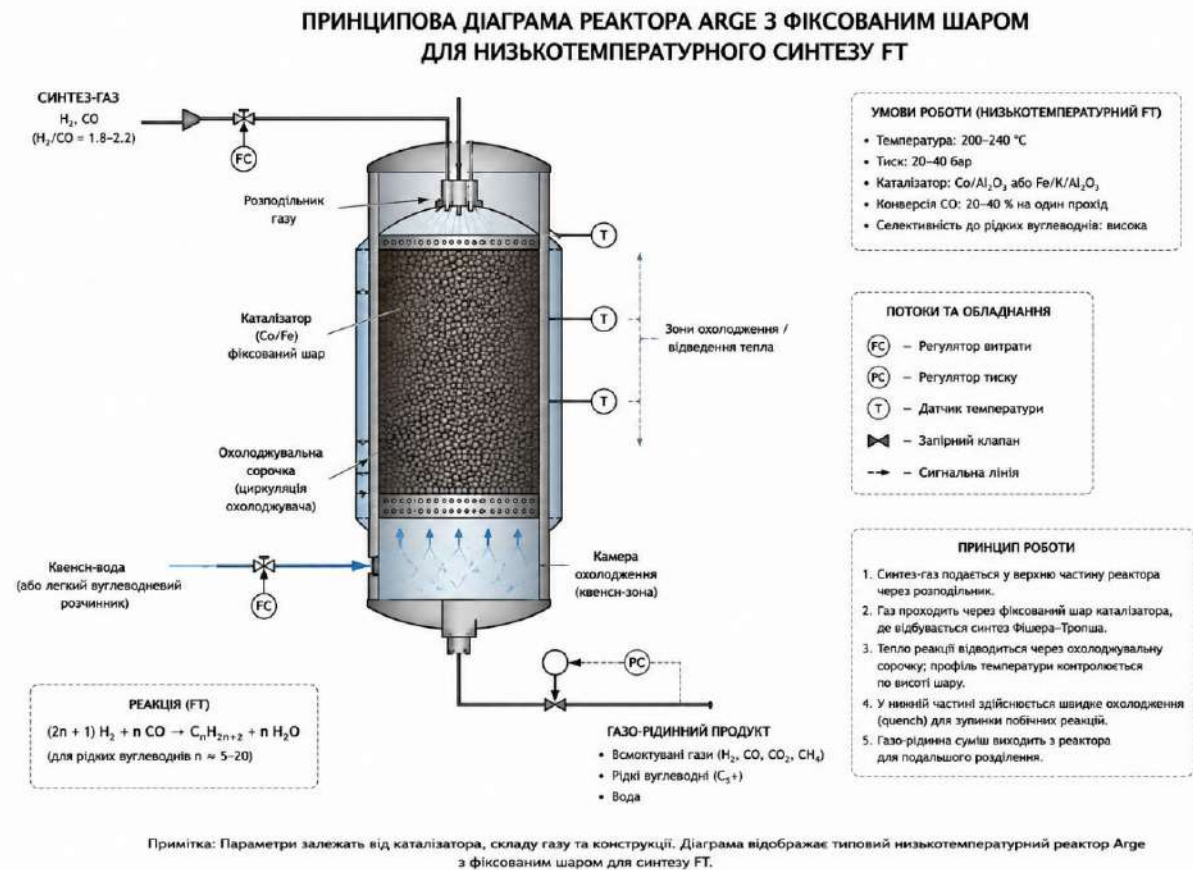


Рисунок 2.3 – Принципова діаграма реактора ARGE з фіксованим шаром для низькотемпературного синтезу FT

Джерело розроблено за допомогою інтернет ресурсу на основі [12]

Промисловий синтез Фішера-Тропша реалізується у двох принципових технологічних режимах, які кардинально відрізняються типом каталізаторів, гідродинамікою реакторів та фракційним складом одержуваних синтетичних вуглеводнів [22].

Низькотемпературний синтез (Low-Temperature Fischer-Tropsch, LTFT) проводиться за температур 200–240 °C та тиску 2–3 МПа на кобальтових або залізних каталізаторах. Основним цільовим продуктом цього процесу є важкі парафіни високої чистоти (віск), які практично не містять ароматичних та сірчистих сполук. Одержаний віск піддають м'якому гідрокрекінгу на біфункціональних каталізаторах для виробництва преміального екологічно чистого дизельного пального та мастильних масел. Головним типом реакційного обладнання для LTFT є багатотрубчасті реактори з нерухомим шаром (Arge) та

трифазні суспензійні колони (Slurry-bed) [12, 23].

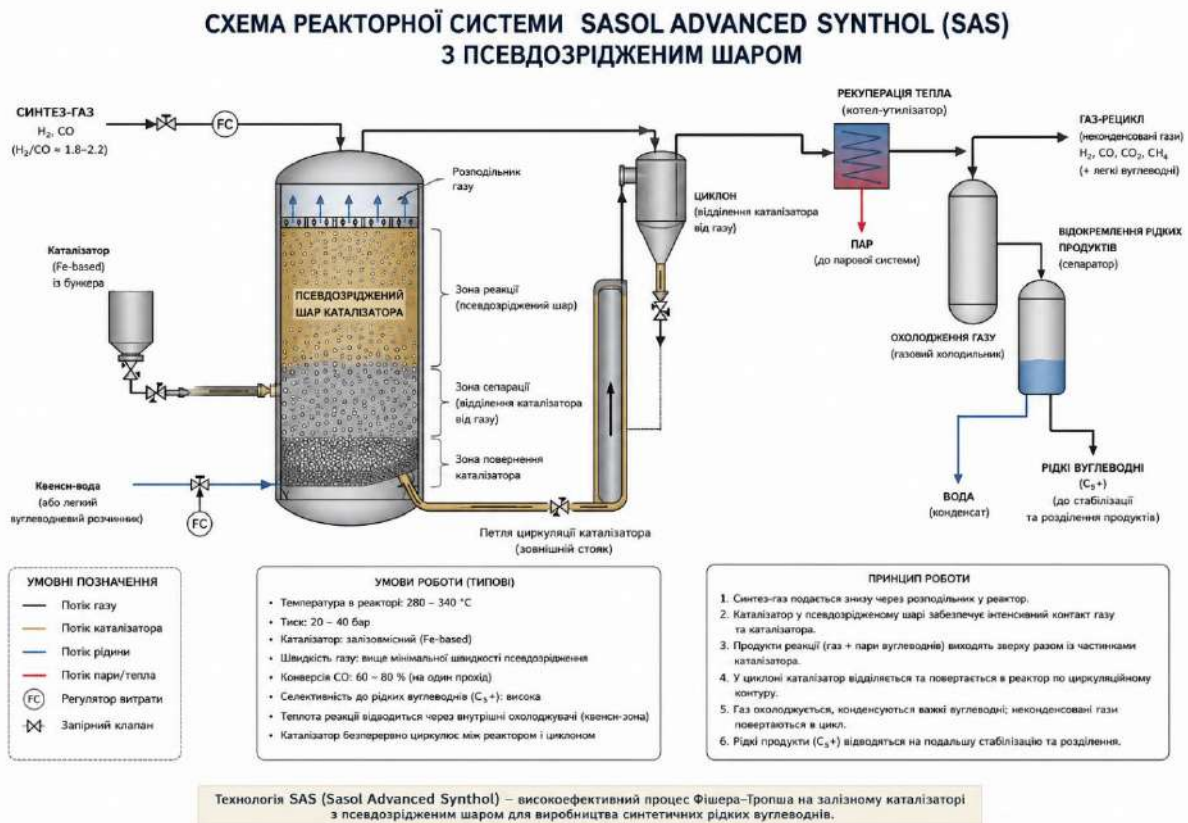


Рисунок 2.4 – Схема реакторної системи Sasol Advanced Synthol (SAS) з псевдозрідженим шаром

Джерело розроблено за допомогою інтернет ресурсу на основі [22]

Високотемпературний синтез (High-Temperature Fischer-Tropsch, HTFT) здійснюється при 320–350 °C на плавлених залізних каталізаторах у реакторах із киплячим шаром (Sasol Advanced Synthol – SAS). У цих умовах усі продукти реакції перебувають у парогазовій фазі. Процес характеризується низькою ймовірністю росту ланцюга ($\alpha = 0,65–0,70$) і орієнтований на виробництво легких олефінів (C₂–C₄) та високооктанової бензинової фракції, що містить значну кількість розгалужених алканів та аліциклічних сполук [22].

Ефективність роботи реакторів синтезу Фішера-Тропша безпосередньо залежить від інтенсивності відведення тепла реакції. Нижче представлені детальні конструкційні схеми промислових апаратів. На рисунку 2.5 наведено багатотрубчастий реактор Arge LTFT [12].

Внутрішня технічна схема реактора Arge з нерухомим шаром для LTFT

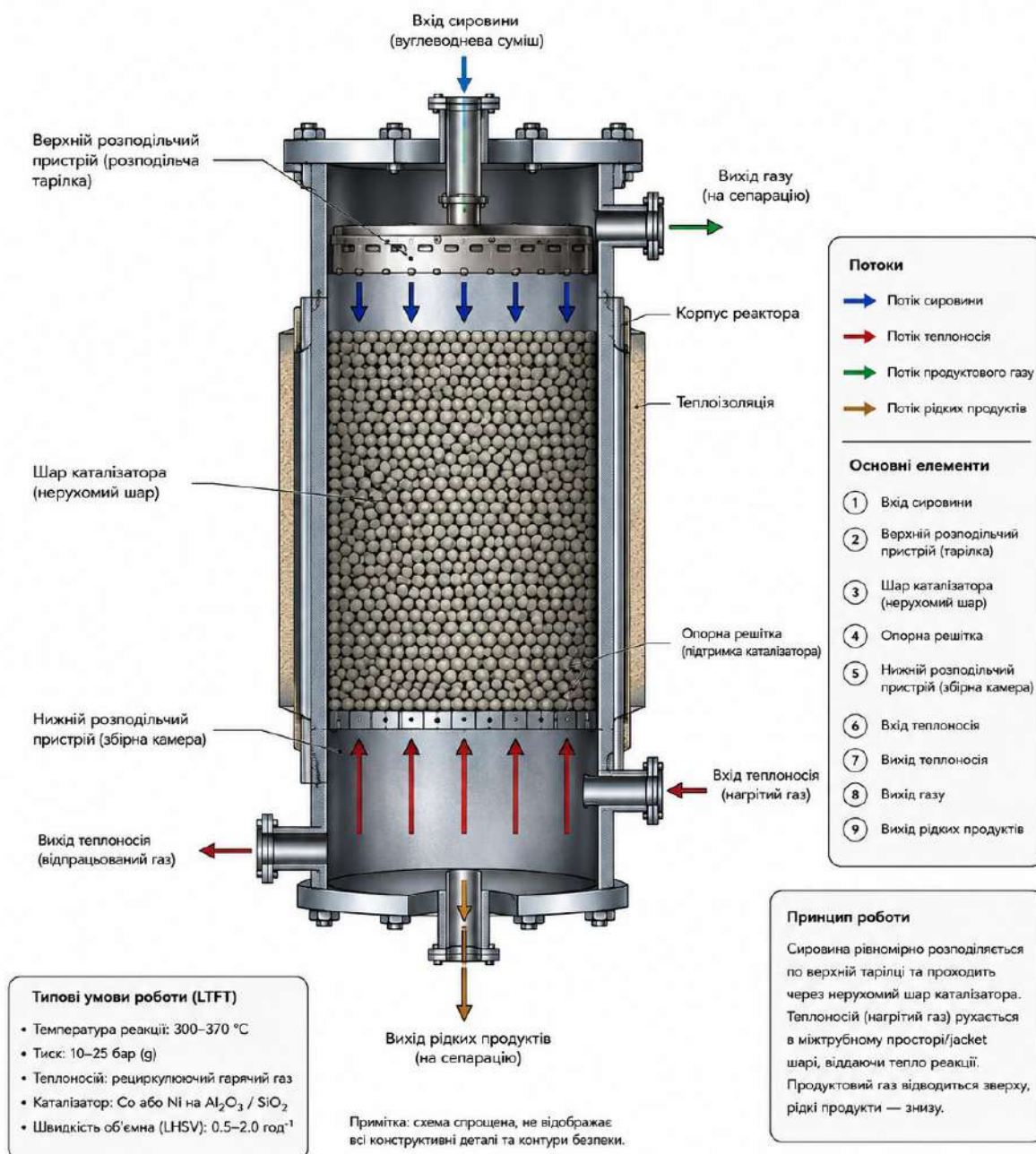


Рисунок 2.5 – Внутрішня технічна схема реактора Arge з нерухомим шаром для LTFT

Джерело розроблено за допомогою інтернет ресурсу на основі [12]

Для подолання дифузійних обмежень та зниження гідродинамічного опору було впроваджено Slurry-bed реактори (рисунок 2.6), де дрібнодисперсний каталізатор циркулює в об'ємі рідкого парафіну, що забезпечує повну

ізотермічність процесу [21, 23].

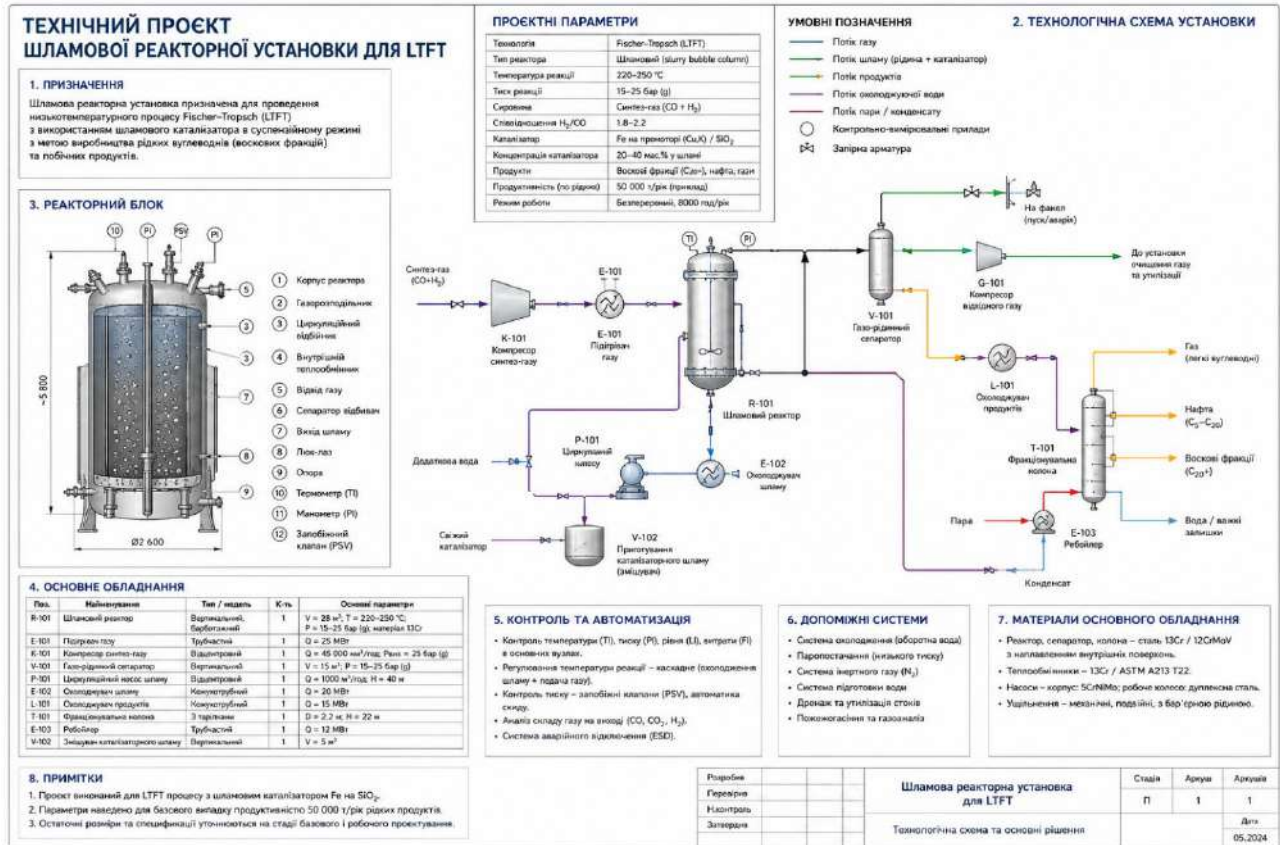


Рисунок 2.6 – Технічний проєкт шламової реакторної установки для LTFT
Джерело розроблено за допомогою інтернет ресурсу на основі [21]

Реактор Arge містить кілька тисяч вертикальних трубок довжиною до 12 метрів, заповнених гранульованим каталізатором. Незважаючи на стабільність роботи та відсутність стирання каталізатора, дані апарати мають значну металоємність та обмежені можливості масштабування. Через це на сучасних заводах їх замінюють на реактори суспензійного типу (Slurry-bed reactor) [23].

Для високотемпературного синтезу (HTFT), метою якого є виробництво бензину та легких моторних палив, компанією Sasol було розроблено реактор із киплячим (псевдозрідженим) шаром каталізатора – Sasol Advanced Synthol (SAS). Його принципова технологічна схема наведена на рисунку 2.3 [22].

У реакторі SAS дрібнодисперсний залізний каталізатор перебуває в режимі інтенсивного псевдозрідження під дією високошвидкісного потоку сировинного газу. Це забезпечує виняткову інтенсифікацію тепло- і масообміну, дозволяючи

досягати високої конверсії монооксиду вуглецю за прохід, проте вимагає встановлення потужних внутрішніх циклонів для уловлювання пилу каталізатора [22, 23].

2.11.3 Реакторний блок прямої гідрогенізації вугілля другого покоління (DCL-2)

Технологічна схема реакторного блока прямого зрідження другого покоління (DCL-2) базується на послідовному двостадійному гідруванні вугільної пасти в каскаді реакторів із висхідним трифазним потоком (Ebullated-bed або Slurry-reactor конфігурації). Принципову схему промислової реакторної секції DCL-2 наведено на рисунку 2.4 [8, 17].

Пряме зрідження вугілля другого покоління (DCL-2) базується на концепції каталітичного гідрогенлізу органічної маси вугілля в умовах відносно м'якого тиску (14–15 МПа) порівняно з німецькими технологіями першого покоління (30–70 МПа). Ключовим фактором успіху DCL-2 є використання вискоелективних нанодисперсних каталізаторів на основі сульфіду заліза ($Fe_{1-x}S$) або молібдену (MoS_2), які вносяться безпосередньо у вугільну пасту у вигляді розчинних прекурсорів (наприклад, нафтенату заліза) [8, 17].

Технологічна схема реакторного блока прямого зрідження другого покоління включає каскад послідовних реакторів із трифазним висхідним киплячим шаром (Ebullated bed). Вугільна паста, що складається з 45–50% мас. подрібненого вугілля, пастоутворювача (рециркуляційної важкої фракції синтетичної нафти) та каталізатора, змішується з воднем, підігрівається у трубчастій печі до 410 °C і подається в перший реактор.

У першому реакторі протікає первинне термічне розчинення вугілля: під дією високої температури (440–450 °C) руйнуються відносно слабкі ефірні та аліфатичні містки між ароматичними кластерами вугільної макромолекули. Утворені радикальні фрагменти стабілізуються воднем від розчинника-донора (тетраліну). У другому реакторі за участю нанокаталізатора відбувається інтенсивний гідрокрекінг важких продуктів (асфальтенів) до легких мальтенів та

масел, а також глибоке очищення від гетероатомів (сірки, азоту, кисню) з виділенням H_2S , NH_3 та H_2O [8, 17].



Примітка: Схема наведена для секції реактора удосконаленого гідрування установки ДКЛ-2 і може відрізнятися в залежності від конкретного проекту.

Рисунок 2.7 – Технологічна схема секції реактора удосконаленого гідрування ДКЛ-2

Джерело розроблено за допомогою інтернет ресурсу на основі [17]

Вугільна паста, що складається з подрібненого вугілля, циркуляційного розчинника та нанокаталізатора, змішується з воднем високого тиску, нагрівається в печі до температури 410–425 °C і надходить у перший реактор. Тут відбувається швидке термічне руйнування слабких зв'язків вугілля. У другому реакторі нанорозмірні частки каталізатора інтенсифікують процеси гідрогенлізу асфальтенів та мальтенів, а також реакції гідродесульфуризації та гідроденітрифікації, що забезпечує отримання якісної синтетичної нафти [8, 17].

2.11.4 Порівняльний техніко-економічний аналіз продуктів

Фізико-хімічні властивості фракцій моторних палив, одержаних за різними технологічними схемами переробки вугілля, мають принципові відмінності. Це обумовлено специфікою хімізму процесів. При непрямому скрапленні (ICL) вуглеводні синтезуються з молекулярних фрагментів, що гарантує відсутність циклічних структур. При прямому зрідженні (DCL) рідкі продукти успадковують нафтові та ароматичні кільця вугільної матриці [14, 25].

У таблиці 2.4 наведено детальні порівняльні характеристики дизельних паливних фракцій для різних варіантів CTL-процесів у зіставленні з вимогами екологічного стандарту Євро-5.

Таблиця 2.4

Фізико-хімічні та експлуатаційні параметри дизельних фракцій різних технологічних схем

Фізико-хімічний параметр	Нафтовий дизель (Євро-5)	Гідрогенізація першого покоління (DCL-1)	Гідрогенізація другого покоління (DCL-2)	Непрямий синтез на Fe-катализаторах (ICL)	Непрямий синтез на Co-катализаторах (ICL)
Цетанове число, од.	51 – 54	42 – 45	46 – 50	60 – 65	70 – 75
Вміст сірки, мг/кг	≤ 10	15 – 30	≤ 5	≤ 1	≤ 2
Вміст ароматики, % мас.	8,0 – 11,0	28,0 – 35,0	20,0 – 24,0	4,0 – 6,0	2,5 – 3,2
Вміст n-парафінів, % мас.	45,0 – 50,0	15,0 – 20,0	18,0 – 22,0	65,0 – 70,0	85,0 – 90,0
Густина при 15 °С, кг/м ³	820 – 845	865 – 880	850 – 860	770 – 780	765 – 775
Температура спалаху, °С	≥ 55	≥ 45	≥ 52	≥ 60	≥ 62

Джерело розроблено за допомогою [14, 22, 25]

Важливим аспектом промислового вибору технології є оцінка питомих витратних коефіцієнтів сировини, енергії та допоміжних матеріалів на виробництво одиниці готової продукції. У таблиці 2.5 представлено порівняльні техніко-економічні показники розглянутих промислових схем переробки вугілля на рідкі моторні палива.

Таблиця 2.5

Питомі витратні коефіцієнти промислових технологій CTL (на 1 т рідких палив)

Показник витрат (на 1 т продукту)	Пряме зрідження DCL-1	Пряме зрідження DCL-2	Сумісна переробка СОСР	Непрямий синтез ICL (LTFT)
Витрата сухого вугілля, т/т	3,2 – 3,5	2,4 – 2,6	2,1 – 2,3	4,0 – 4,5
Витрата технологічної води, м ³ /т	9 – 11	6 – 7	5.5 – 6.2	12 – 15
Споживання чистого водню, т/т	0,07 – 0,09	0,05 – 0,06	0,04 – 0,05	автономно (з газу)
Питомі викиди CO ₂ , т/т палива	2,8 – 3,2	1,8 – 2,2	1,4 – 1,6	3,8 – 4,4
Термічний ККД процесу, %	42 – 45	54 – 58	59 – 63	46 – 50

Джерело розроблено за допомогою [26, 27, 29, 30].

На основі системного порівняння параметрів таблиць 2.4 та 2.5 можна зробити висновок, що технологія непрямого скраплення вугілля (ICL) забезпечує отримання дизельного пального преміальної якості з рекордно високим

цетановим числом (70–75 одиниць) та мінімальним вмістом ароматичних сполук, що мінімізує утворення сажі при згорянні в двигунах. Проте ця технологія має найнижчий загальний термічний ККД (46–50%) та підвищені питомі викиди діоксиду вуглецю через необхідність повної руйнації вугільної структури до рівня сингізу.

Технології прямого зрідження другого покоління (DCL-2) та сумісної переробки вугілля з біомасою (СОСР) демонструють значно кращі техніко-економічні показники: питома витрата вугілля знижується до 2,4–2,6 т/т, а термічний ККД зростає до 54–63%. Одержані за цими схемами паливні фракції мають високу густину та теплоту згоряння завдяки збереженню нафтових кілець, але вимагають проведення додаткового каталітичного облагородження (гідрофінінгу) для підвищення цетанового числа до нормативних вимог Євро-5.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Виробництво синтетичних рідких палив з вугілля за технологією прямого гідрогенізаційного скраплення (DCL-2) належить до хімічно небезпечних виробництв із високим ступенем потенційної небезпеки. Відповідно до класифікації [31], процеси DCL-2 характеризуються наявністю таких основних небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

- **Хімічний фактор:** робота з токсичними речовинами (бензол, феноли, сірководень, оксид вуглецю), канцерогенними вуглеводнями (поліциклічні ароматичні сполуки) та корозійно-активними середовищами [32];
- **Пожежо- та вибухонебезпека:** використання водню під тиском до 15 МПа, легкозаймистих розчинників (водень-донорних) та отримання легких вуглеводневих фракцій (температура спалаху нижче +28°C) [33];
- **Термічний фактор:** проведення процесів при температурах 420-450°C та наявність нагрітих поверхонь обладнання [34];
- **Фізичне навантаження:** шум, вібрація від компресорного та насосного обладнання, підвищений тиск у реакторах [35].

У табл. 3.1 наведено кількісну характеристику основних небезпечних факторів.

Таблиця 3.1

Характеристика небезпечних факторів виробництва DCL-2

Фактор	Джерело	Діапазон значень	ГДК/ГДР
Сірководень (H ₂ S)	Десульфуризація	0-1000 ppm	10 мг/м ³
Оксид вуглецю (CO)	Газифікація коксу	0-500 ppm	20 мг/м ³
Водень (H ₂)	Циркуляційний газ	до 15 МПа	вибухонебезпечний

Шум	Компресори	85-105 дБ(А)	80 дБ(А)
Температура поверхонь	Реактори, трубопроводи	50-450°C	>45°C (небезпека опіків)

Джерело: розроблено за допомогою [32; 33; 35]

3.2 Заходи з техніки безпеки при експлуатації установок DCL-2

3.2.1 Вимоги до герметизації обладнання

Основним заходом запобігання викидам небезпечних речовин є забезпечення абсолютної герметизації реакторів високого тиску, теплообмінників та арматури. Для цього застосовуються:

- безсальникові ущільнення на запірній арматурі;
- подвійні торцеві ущільнення на насосах із контролем буферної рідини;
- системи автоматичного контролю герметичності фланцевих з'єднань з сигналізацією перевищення допустимих витоків [36].

Відповідно до НПАОП 0.00-1.21-18 [37], для реакторів DCL-2 обов'язковим є оснащення системами безпечного скидання тиску та запобіжними клапанами з дублюванням.

3.2.2 Захист від вибухів водню та парів вуглеводнів

Враховуючи, що водень у суміші з повітрям утворює вибухонебезпечні концентрації (4-75% об.), передбачаються:

- безперервний газовий контроль (аналізатори H_2 , CH_4 , CO) у приміщеннях компресорних та реакторного блоку;
- примусова вентиляція з кратністю повітрообміну не менше 10 об'ємів/год у вибухонебезпечних зонах;
- виконання електрообладнання у вибухозахищеному виконанні (Ex_d / Ex_c) згідно з ПУЕ [38];
- заземлення всього технологічного обладнання для відведення статичної електрики [39].

3.3 Промислова санітарія та гігієна праці

3.3.1 Контроль шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Для технології DCL-2 гранично допустимі концентрації (ГДК) основних шкідливих речовин у повітрі робочої зони встановлені ДСН 3.3.6.042-99 [40]:

- сірководень (H_2S) – 10 мг/м³ (максимально разова);
- оксид вуглецю (CO) – 20 мг/м³;
- бензол – 5 мг/м³ (канцероген);
- фенол – 0,3 мг/м³.

Контроль здійснюється стаціонарними газоаналізаторами з виведенням сигналу на пульт управління та переносними приладами (типу “Коліон-1” або “СЕАН”) не рідше 1 разу на зміну в критичних точках [41].

3.3.2 Захист від теплового випромінювання

У зонах розміщення реакторів (температура зовнішніх поверхонь до 200°C) та трубчастих печей передбачається:

- теплова ізоляція обладнання з температурою зовнішньої поверхні не більше 45°C;
- екранування джерел теплового випромінювання алюмінієвими або сталевими оцинкованими екранами;
- локальні системи повітряного душення робочих місць (швидкість подачі повітря 2-3,5 м/с) [42].

3.4 Пожежна безпека

3.4.1 Категорії вибухопожежної небезпеки

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [43], установки DCL-2 належать до категорії А (вибухопожежонебезпечні) через наявність водню та легкозаймистих рідин (ЛЗР). Розрахунковий надлишковий тиск при вибуху воднево-повітряної

суміші може досягати 600 кПа. У табл. 2 наведено пожежні характеристики основних речовин.

Таблиця 3.2

Пожежонебезпечні характеристики речовин процесу DCL-2

Речовина	Температура спалаху, °С	Нижня концентраційна межа поширення полум'я, % об.	Група горючості
Водень	–	4,0	ГГ
Бензин (фр. C ₅ -C ₁₂)	< -20	1,1	ЛЗР
Дизельна фракція	> 40	0,6	ГР
Розчинник (тетралін)	68	0,8	ГР

Примітка: ГГ – горючий газ; ЛЗР – легкозаймиста рідина; ГР – горюча рідина.

Джерело: розроблено за допомогою [44]

3.4.2 Системи пожежогасіння

Для забезпечення пожежної безпеки на виробництві DCL-2 передбачаються:

- автоматична система пожежогасіння пінною (на резервуарному парку ЛЗР) та водою (на реакторному блоці);
- установки газового пожежогасіння (азот, діоксид вуглецю) у закритих розподільчих пристроях та апаратних залах;
- первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники ОП-50, ОП-100) згідно з типовими нормами [45].

Нормативний запас води для зовнішнього пожежогасіння становить не менше 200 л/с протягом 3 годин [46].

3.5 Безпека при аварійних ситуаціях

3.5.1 Типові аварійні сценарії

На основі аналізу ризиків для виробництва DCL-2 [47] визначено такі основні аварійні сценарії:

1. Розгерметизація реактора високого тиску з викидом водню та вуглеводнів;
2. Пожежа протоки ЛЗР (тетралін, бензинова фракція);
3. Вибух воднево-повітряної суміші в компресорній;
4. Розлив фенольних вод та забруднення ґрунтових вод.

Для кожного сценарію розроблено плани ліквідації аварій (ПЛАС), які переглядаються не рідше 1 разу на рік.

3.5.2 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Обов'язковий мінімальний комплект ЗІЗ для операторів DCL-2 включає [48]:

- протигаз фільтрувальний (марка В, КД, або комбінований) – для захисту від H_2S , фенолу, органічних парів;
- ізолюючий дихальний апарат (АП-96, “Омега”) – для роботи в зонах з концентрацією $\text{O}_2 < 18\%$ або невідомих забрудненнях;
- костюм із тепловідбивного матеріалу (ТОК) – при гасінні пожежі;
- захисні окуляри, каска з підшоломником, рукавиці кислотостійкі.

3.6 Оцінка відповідності нормативним вимогам

У табл. 3.3 проведено порівняння пропонованих заходів з основними нормативними документами України.

Відповідність заходів безпеки нормативним вимогам

Нормативний документ	Вимога	Реалізація у проекті DCL-2	Відповідність
НПАОП 0.00-1.21-18	Герметизація обладнання	Подвійні ущільнення, газоконтроль	+
ДСТУ 7239:2011	Вибухозахист електрообладнання	Ex d, Ex e	+
ДСН 3.3.6.042-99	ГДК H ₂ S (10 мг/м ³)	Автоматичний контроль, сигналізація	+
ДБН В.1.1-36:2016	Категорія А, пінне пожежогасіння	Установки ОПС (пінні, водяні)	+

Джерело: розроблено автором

ВИСНОВОК

У сучасному секторі переробки вугілля на синтетичне рідке паливо (CTL) домінуючою технологією є непряме зрідження (ICL), що реалізується через процес Фішера-Тропша. Цей метод дозволяє отримувати високоякісні палива з надзвичайно низьким вмістом сірки (менше 2 мг/кг) та високим цетановим числом (понад 70). Експериментально підтверджено, що в температурному діапазоні 227–230 °C та за тиску 25–30 бар вихід дизельної фракції сягає 57–62 % [1, 5]. Революційним проривом 2025 року стало розроблення методу каталітичного придушення утворення CO₂ у FT-синтезі за допомогою бромистого метану в концентраціях на рівні мільйонних часток (ppm). Цей підхід дозволяє знизити викиди вуглекислого газу з 30 % до менш ніж 1 % та підвищити селективність за олефіновими фракціями до приблизно 85 %.

Пряме зрідження вугілля другого покоління (DCL-2) демонструє значний прогрес порівняно з технологіями першого покоління (DCL-1). Зокрема, спостерігається зниження споживання води на 29 %, енергії – на 31 %, а викидів CO₂ – на 37 %, при одночасному покращенні економічних показників. Серед інноваційних рішень технологія СОСР вирізняється найнижчим водоспоживанням (зниження на 64 %) та помірними капітальними витратами, однак її економічна привабливість обмежена через складний склад сировинної бази.

Вирішальну роль у підвищенні конкурентоспроможності CTL-технологій відіграють державна підтримка (субсидування до 20 % капітальних витрат, довгострокові контракти на вугільну сировину), впровадження систем захоронення вуглецю (CCS) та використання «зеленого» водню. Країни з великими запасами вугілля, такі як Індія, Китай та США, активно розвивають ці напрями в рамках власних енергетичних стратегій [2, 6]. Перспективними напрямками подальшого розвитку є гібридні схеми CTL із використанням біомаси (включно з мікрободоростями), інтеграція з високотемпературними електролізерами типу Co-SOEC (концепція Power-to-Liquid), а також перехід до

малих модульних реакторів Фішера-Тропша, що дозволить знизити капіталомісткість проєктів та підвищити їхню гнучкість.

Проведений системний аналіз технологій виробництва синтетичних моторних палив з вугілля, які належать до двох основних класів – прямого гідрогенізаційного скраплення (DCL) та непрямого скраплення через синтез-газ (FTS, MTG), – засвідчив, що найвищу технологічну ефективність мають технології DCL-2. Вони забезпечують термічний ККД до 60 %, вихід рідких продуктів до 65 %, а також зниження енергоспоживання на 31 % та викидів CO₂ на 37 % порівняно з DCL-1. Економічний аналіз показав, що найбільш конкурентоспроможною є саме технологія DCL-2, тоді як традиційний FT-процес має значно вищу вартість кінцевого продукту (удвічі вищу, ніж у DCL-1). Технологія СОСР вирізняється кращими екологічними характеристиками, однак поступається за економічними показниками. За результатами багатокритеріального оцінювання із застосуванням методу аналізу ієрархій оптимальною визнано технологію прямого гідрогенізаційного скраплення вугілля другого покоління (DCL-2), яка отримала інтегральний показник 8,15 за 10-бальною шкалою. Подальші дослідження будуть зосереджені на детальній розробці математичної моделі обраного процесу DCL-2 та оптимізації його ключових параметрів для підвищення виходу цільових продуктів.

Виробництво синтетичних моторних палив за технологією DCL-2 належить до категорії підвищеної небезпеки через використання водню під тиском 15 МПа, легкозаймистих розчинників, а також токсичних речовин, зокрема сірководню, бензолу та фенолу. Основними заходами техніки безпеки є герметизація обладнання з подвійними ущільненнями, безперервний газовий контроль у вибухонебезпечних зонах, а також виконання електрообладнання у вибухозахищеному виконанні (типи Ex d / Ex e). Для захисту персоналу обов'язковим є застосування фільтрувальних протигазів (марок В та КД), ізолювальних дихальних апаратів і тепловідбивних костюмів. Установки DCL-2 відносяться до категорії А за рівнем вибухопожежної небезпеки та повинні оснащуватися автоматичними системами пінного й водяного пожежогасіння з

резервним джерелом живлення. Розроблені заходи повністю відповідають вимогам чинних нормативних документів України (НПАОП, ДСТУ, ДСН, ДБН), що підтверджує можливість безпечної експлуатації такого виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Production and Characterization of Synthetic Diesel Fuel from Coal via Fischer–Tropsch Indirect Liquefaction / Dullievich A.K., Abdirahmanovna Q.Y., Savelievna S.N., Mikhailovich D.E. // Tikrit Journal of Engineering Sciences. – 2025. – Vol. 32, No. 3. – P. 1-9.

2. India clears US\$3.9 billion push to turn coal into gas to reduce imported fuel reliance // The Business Times. – 2026. – 13 May. – Electronic text data. – Access mode: www.businesstimes.com.sg

3. Technological advancements in coal-to-liquid systems for enhanced environmental and economic benefits / Zhang L., Wang Y., Chen X., et al. // Energy. – 2025. – Vol. 338. – Art. No. 138836. – DOI: 10.1016/j.energy.2025.138836.

4. Tandl M. Innovative Advancement in Power-to-Liquid Technology: The Creation of a Highly Efficient Co-SOEC-Based SAF Production Demo Plant // Meeting Abstracts. – 2025. – Vol. MA2025-03. – P. 271. – DOI: 10.1149/MA2025-031271mtgabs.

5. Production and Characterization of Synthetic Diesel Fuel from Coal via Fischer–Tropsch Indirect Liquefaction / Dullievich A.K., Abdirahmanovna Q.Y., Savelievna S.N., Mikhailovich D.E. // Tikrit Journal of Engineering Sciences. – 2025. – Vol. 32, No. 3. – P. 1-9.

6. Coal Gasification Gets ₹37,500 Crore Push; What the Scheme Means for India // DSIJ Website. – 2026. – 13 May. – Electronic text data. – Access mode: insights.dsj.in

7. A review of the co-pyrolysis of low-rank coals and microalgae biomass for fuel production / Nyoni B., Dlamini L.N., Hlangothi S.P. // Journal of the Energy Institute. – 2025. – Vol. 118. – Art. No. 101902. – DOI: 10.1016/j.joei.2025.101902.

8. Chemical additive slashes carbon emissions when creating synthetic fuels / Service R.F. // Science. – 2025. – 30 October. – Vol. 390, Issue 6769. – DOI: 10.1126/science.adi2508.

9. IEA. World Energy Outlook 2024. – Paris: International Energy Agency, 2024. – 450 p.
10. BP Statistical Review of World Energy 2024. – London: BP, 2024. – 60 p.
11. Song X., Li J., Wang Y., et al. Technological advancements in coal-to-liquid systems for enhanced environmental and economic benefits // *Energy*. – 2025. – Vol. 338. – Art. 138836.
12. OPEC. World Oil Outlook 2024. – Vienna: Organization of the Petroleum Exporting Countries, 2024. – 350 p.
13. Shah R. J., Forester D. R. Coal-to-Liquid Conversion Processes: A Review // *Fuels and Lubricants Handbook*. – 2nd ed. – ASTM International, 2019. – P. 115–143.
14. National Energy Administration of China. China Energy Development Report 2024. – Beijing: NEA, 2024. – 220 p.
15. Liu Z., Yang J., Wang C. Coal liquefaction technologies: Status and prospects // *Fuel Processing Technology*. – 2023. – Vol. 245. – Art. 107725.
16. Li X., Zhang Y., Wang H. Direct coal liquefaction: A comprehensive review of process fundamentals and technological developments // *Energy & Fuels*. – 2024. – Vol. 38, No. 8. – P. 6543–6572.
17. Shenhua Group. Coal-to-liquid technology: Operational experience and optimization // *Shenhua Technology Review*. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – P. 34–52.
18. Whitehurst D. D., Mitchell T. O., Farcasiu M. Coal Liquefaction: The Chemistry and Technology of Thermal and Catalytic Processes. – New York: Academic Press, 2023. – 400 p.
19. Skoptsov G., Strohm J. Wave Liquefaction™: The Novel Coal-Biomass to Liquids Process [Электронный ресурс] // NETL. – 2015. – Режим доступа: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2015/gas-ccbtl-proceedings/skoptsov-CCBTL-Poster.pdf>
20. Dry M. E. The Fischer-Tropsch process: 1950-2000 // *Catalysis Today*. – 2022. – Vol. 71, No. 3-4. – P. 227–241.

21. Higman C., van der Burgt M. Gasification. – 3rd ed. – Oxford: Gulf Professional Publishing, 2024. – 600 p.
22. de Klerk A. Fischer-Tropsch Refining. – Weinheim: Wiley-VCH, 2022. – 500 p.
23. Steynberg A. P., Dry M. E. Fischer-Tropsch Technology. – Amsterdam: Elsevier, 2023. – 750 p.
24. Chang C. D. Methanol-to-gasoline process // Catalysis Reviews. – 2023. – Vol. 65, No. 1. – P. 1–44.
25. Mobil Oil Corporation. The MTG process: Commercial experience in New Zealand // Hydrocarbon Processing. – 2022. – Vol. 101, No. 5. – P. 67–75.
26. Zhang Y., Liu G., Larson E. D., et al. Co-processing of coal and biomass for liquid fuels production: A life-cycle assessment // Applied Energy. – 2024. – Vol. 356. – Art. 122416.
27. Liu G., Larson E. D., Williams R. H., et al. Process modeling of direct coal-biomass to liquids (CBTL) plants with shale gas utilization and CO₂ capture and storage (CCS) // Applied Energy. – 2016. – Vol. 183. – P. 1616–1632.
28. MESSAGEix Documentation. Liquid Fuel Production [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.messageix.org/projects/global/en/main/energy/conversion/other.html>
29. Davis S. J., Lewis N. S., Shaner M., et al. The economics of coal-to-liquid fuels in a carbon-constrained world // Nature Energy. – 2023. – Vol. 8. – P. 456–468.
30. NETL. Carbon Capture and Storage for Coal-to-Liquid Plants. – Pittsburgh: National Energy Technology Laboratory, 2024. – 120 p.
31. ДСТУ 2298-93. Виробництво хімічне. Терміни та визначення основних понять. – Київ: Держстандарт України, 1993. – 35 с.
32. Пампура Н. М., Березуцький В. В., Колесніков В. О. Безпека хімічних виробництв. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 280 с.
33. НПАОП 0.00-1.31-18. Правила безпеки у виробництвах водню та водневмісних газів. – Київ: Держпраці, 2018. – 95 с.

34. ГОСТ 12.2.003-91. ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – Москва: Издательство стандартов, 1991. – 12 с.
35. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Київ: МОЗ України, 1999. – 32 с.
36. API RP 521. Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems. – 6th ed. – Washington: American Petroleum Institute, 2020. – 150 p.
37. НПАОП 0.00-1.21-18. Правила безпечної експлуатації обладнання, що працює під тиском. – Київ: Держпраці, 2018. – 210 с.
38. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ-2017). – Харків: Форт, 2017. – 760 с.
39. ДСТУ EN 60079-14:2017. Вибухонебезпечні середовища. Частина 14. Проектування, вибір та монтаж електроустановок. – Київ: УкрНДНЦ, 2017. – 110 с.
40. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони. – Київ: МОЗ України, 1999. – 85 с.
41. Калетнік Г. М., Орел Т. Л. Основи охорони праці в хімічній промисловості. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 340 с.
42. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Київ: Мінрегіон України, 2013. – 140 с.
43. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – Київ: УкрНДНЦ, 2016. – 45 с.
44. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1989. – 95 с.
45. НАПБ А.01.001-2014. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. – Київ: ДСНС України, 2014. – 28 с.
46. ДБН В.1.1-34:2013. Протипожежний захист. Водопостачання зовнішнє пожежне. – Київ: Мінрегіон України, 2013. – 55 с.
47. Методика оцінки ризиків для небезпечних виробництв (МОР-2019). – Київ: Держпраці, 2019. – 60 с.

48. НПАОП 0.00-1.15-17. Порядок забезпечення працівників засобами індивідуального захисту. – Київ: Держпраці, 2017. – 24 с.

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

ДОВІДКА

про підготовку здобувача

Стаднік Альона Юріївна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Спеціальність 161 Хімічних технологій та інженерії

Назва кваліфікаційної роботи Кваліфікаційна бакалаврська робота

Тема кваліфікаційної роботи Аналіз технологій виробництва
синтетичних моторних палив з вугілля та
перспективність розвитку технологій

Керівник кваліфікаційної роботи: к.т.н., доцент Десна Н.А.

(посада, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консульта	Примітка
1	Аналітична частина	Десна Н.А.	зараховано	12.05.26		
2	Основна частина	Десна Н.А.	зараховано	26.05.26		

Зав. кафедри _____

(підпис)

_____ К.О. Шмельцер

(ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 20__ р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
 Кафедра Хімічних технологій та інженерії

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

бакалавра

Здобувача Стаднік Альони Юріївни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи ЗХТ-23ск

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра

Аналіз технологій виробництва синтетичних моторних палив з вугілля та перспективність розвитку технологій

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	<u>64;</u>
таблиць	<u>10;</u>
схем і рисунків	<u>7;</u>
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	<u>-.</u>

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи бакалавра

Кваліфікаційна робота присвячена актуальній науково-технічній проблемі – дослідженню сучасних технологій переробки вугілля у синтетичні рідкі палива (Coal-to-Liquid, CTL) та оцінці їх техніко-економічної й екологічної ефективності. Актуальність теми зумовлена зростаючими потребами світової енергетики, необхідністю диверсифікації джерел енергоресурсів та пошуком технологій, здатних забезпечити енергетичну безпеку держав із значними запасами вугілля.

У роботі проведено ґрунтовний аналіз сучасних технологій прямого та непрямого зрідження вугілля, розглянуто фізико-хімічні основи процесів, особливості реакторних систем і каталітичних комплексів, а також виконано порівняльну оцінку якості отримуваних моторних палив. Значну увагу приділено екологічним аспектам виробництва синтетичних палив, питанням скорочення викидів парникових газів та перспективам впровадження інноваційних рішень у процесі Фішера–Тропша.

Робота відзначається логічною структурою, послідовністю викладення матеріалу, достатньою глибиною аналізу та належним рівнем оформлення.

Поставлені завдання виконані в повному обсязі, а сформульовані висновки є обґрунтованими та відповідають змісту проведеного дослідження.

Недоліки кваліфікаційної роботи бакалавра

(бакалавра, магістра)

Робота базується на аналізі літературних джерел і не містить власних експериментальних досліджень.

В деяких місцях пояснювальної записки допущені стилістичні та орфографічні помилки та огріхи, в тексті зустрічається невдалий переклад.

Характеристика загальної, спеціальної і виробничої підготовки автора кваліфікаційної роботи магістра, ступінь самостійності виконання роботи, вміння користуватися літературними матеріалами

Здобувачка Стаднік А.Ю. під час написання кваліфікаційної бакалаврської роботи показала добру загальну та спеціальну підготовку, вміння працювати з літературними та нормативними джерелами. Над розділами роботи працювала самостійно, висновки та розроблені рекомендації є актуальними, ефективними та економічно обґрунтованими.

Можливість використання кваліфікаційної роботи бакалавра

Розроблені рішення та рекомендації по впровадженню способів переробки вугілля з отриманням рідких видів палива можуть бути впровадженні на КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавра

Керівник Десна Наталя Анатоліївна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Доцент, к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

« ____ » _____ 20__ р.

*Примітка. Бланк друкується з обох сторін на одному аркуші.

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Стаднік Альона Юріївна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота («Петрографічні аспекти формування гарячої міцності коксу при карбонізації вугілля») виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений(а). Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

12.06.2026

Д О В І Д К А

про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):

- кваліфікаційної роботи;
- навчальної/наукової праці;
- наукових матеріалів

Аналіз технологій виробництва синтетичних моторних палив з вугілля та перспективність розвитку технологій

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

Стаднік Альона Юріївна

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії,

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 64 сторінок друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrakePlagiarism».

Рівень оригінальності становить 0,95 %.

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадіння із:

- власними публікаціями;
- термінологією;
- посиланнями на літературу, праці вчених;
- посиланнями на законодавство;
- загальноживаними фразами.

Матеріали було розглянуто та рекомендовано до захисту в ЕК
(подальшого розгляду, друку, опублікування)

на засіданні кафедри Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від «12» червня 2026 р. протокол №16.

Керівник підрозділу _____

(підпис)

К. Шмельцер

Дата «12» червня 2026 р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
 Кафедра Хімічних технологій та інженерії

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

(бакалавра, магістра)

Здобувача Стаднік Альони Юріївни

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи ЗХТ-23ск
Тема кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u>
(бакалавра, магістра)
Аналіз технологій виробництва синтетичних моторних палив з вугілля та перспективність розвитку технологій
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u>
(бакалавра, магістра)
Сучасні технології виробництва синтетичних моторних палив з вугілля
Переваги кваліфікаційної роботи <u>бакалавра</u>
(бакалавра, магістра)
Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена актуальній науково-технічній проблемі розвитку технологій переробки вугілля на синтетичні моторні палива в умовах зростання світового попиту на енергоресурси та необхідності підвищення енергетичної незалежності держав. Тематика роботи є своєчасною та відповідає сучасним тенденціям розвитку паливно-енергетичного комплексу й хімічної технології.
У роботі проведено комплексний аналіз сучасних технологій прямого та непрямого зрідження вугілля, розглянуто фізико-хімічні основи процесів гідрогенізації та синтезу Фішера–Тропша, проаналізовано особливості реакторних систем та каталітичних комплексів, що використовуються у виробництві синтетичних палив.
Автором виконано порівняльну оцінку техніко-економічних та екологічних показників технологій DCL-1, DCL-2, СОСР та ICL.
Недостатньо розглянуто питання інтеграції технологій СТЛ із відновлюваними джерелами енергії та сучасними системами уловлювання й утилізації вуглекислого газу;
Відсутнє математичне моделювання обраної технологічної схеми DCL-2, що могло б підвищити практичну цінність роботи.
Рекомендації: робота виконана на актуальну тему, має практичну цінність, містить обґрунтовані результати і рекомендації, а зазначені недоліки не мають принципового характеру та не впливають на загальну позитивну оцінку.
Робота може бути рекомендована до захисту.
Рецензент

(прізвище, ім'я та по-батькові)

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання)

_____ (підпис)