

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття ступеня вищої освіти БАКАЛАВРА  
Бакалавра (Магістра)

**Аналіз та оптимізація процесу каталізаторної депарафінізації  
дизельного палива**

Назва теми

Галузь знань 27 Транспорт  
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Автомобільний транспорт  
Назва

Шифр КвРАТ. 23451.02.01.00

Виконав студент(ка) 3-го курсу  
група АТзс 23-2  
Шифр

  
Підпис

Микола ПАСТУХ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

  
Підпис

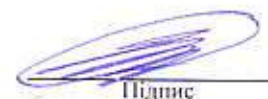
Михайло ГЕТЬМАН  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ  
Посада

  
Підпис

Олег БАБАК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ  
Назва

  
Підпис

Олександр ДИХА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 10 06 2026

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

культет інженерії, транспорту та архітектури

федра трибології, автомобілів та матеріалознавства

вітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

пряма підготовки (спеціальність) 274 «Автомобільний транспорт»

вітньо-професійна програма «Автомобільний транспорт»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

## **ЗАВДАННЯ** НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Пастуху Миколі

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Аналіз та оптимізація процесу каталізаторної депарафінізації  
дизельного палива».

рівник роботи Гетьман Михайло Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

тверджено наказом університету від 20 січня 2026 р. № 7 (Д14)

Строк подання студентом роботи на кафедру 16.06.2026 р.

Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; матеріали курсових  
робіт.

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Загальні відомості;

2. Об'єкт та методи досліджень;

3. Розрахунково-аналітичний розділ.

4. Результати проведеної роботи.

Перелік графічного матеріалу (презентація)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на  
лайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15.04 2026р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітки
1	<i>Загальні відомості;</i>	<i>28.05.2026</i>	
2	<i>Об'єкт та методи досліджень;</i>	<i>08.06. 2026</i>	
3	<i>Розрахунково-аналітичний розділ</i>	<i>11.06. 2026</i>	
4	<i>Результати проведеної роботи</i>	<i>13.06.2026</i>	
5	<i>Висновки</i>	<i>14.06. 2026</i>	
6	<i>Захист дипломної роботи</i>	<i>16.06. 2026</i>	

Студент

  
Підпис

Керівник роботи

  
Підпис

Микола ПАСТУХ  
ім'я, прізвище

Михайло ГЕТЬМА  
ім'я, прізвище

## Реферат

Бакалаврську випускную роботу виконав студент 3 курсу, група АТзс-23-2 Пастух Микола на тему: «Аналіз та оптимізація процесу каталізаторної депарафінізації дизельного палива».

У дипломній роботі розглянуто питання процесу оптимізації каталізаторної депарафінізації дизельного палива.

У першому розділі описано основні показники якості сучасного дизельного палива, а також вимоги та характеристики дизельного палива .

У другому розділі було визначено об'єкт та методи досліджень. А також основні технологічні параметри процесу депарафінізації

У третьому розділі ми визначили вплив температури на процес каталітичної депарафінізації та вплив складу сировина на процес каталітичної депарафінізації.

В четвертому розділі були описані результати проведеної роботи.

Випускна робота складається з 60 сторінок, містить у собі 4 ілюстрацій, 2 таблиць та 15 джерел.

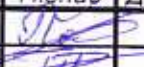



Ключеві слова:  $Cu_xMo_yS_z$ , ВЛАСТИВОСТІ, ПОКРИТТЯ, МІДЬ, ПРОЦЕС, ТЕРТЯ.

ПАСТУХ

ГЕТЬМА

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. <b>Загальні відомості.....</b>	8
1.1 Вимоги та характеристики дизельного палива.....	8
1.2 Основні показники якості сучасного дизельного палива.....	12
1.3 Виробництво та застосування зимових та арктичних марок дизельного палива.....	19
1.4 Цілі та завдання кваліфікаційної роботи.....	23
2. <b>Об'єкт та методи досліджень.....</b>	26
2.1 Основні технологічні параметри процесу депарафінації.....	26
2.2 Опис математичної моделі та комп'ютерної системи імітаційного моделювання процесу каталітичної депарафінації.....	31
3. <b>Розрахунково-аналітичний розділ.....</b>	38
3.1 Вплив температури на процес каталітичної депарафінації...38	
3.2 Вплив складу сировина на процес каталітичної депарафінації.....	41
3.3 Вплив активності каталізатора на процес депарафінації.....	45
4. <b>Результати проведеної роботи.....</b>	50
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	54
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	58
<b>ДОДАТКИ.....</b>	60

<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>				
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат.
Розроб.		Пастух		
Перевір.		Гетьман		
Реценз.				
Н. Контр.		Бабак		
Затверд.		Диха		
Аналіз та оптимізація процесу каталізаторної депарафінації дизельного палива				
		Літ.	Арк.	Акрюшів
		4	60	ХНУ група МТВАз 22-1

## ВСТУП

У сучасних умовах країни Європи приділяють значну увагу розвитку енергетичного сектору, транспорту та освоєнню північних регіонів, зокрема територій Північної Європи та акваторії Північного Льодовитого океану. Активне використання морських транспортних маршрутів, розширення логістичних зв'язків, а також видобуток нафти й природного газу в районах із суворими кліматичними умовами потребують забезпечення техніки високоякісним дизельним паливом, придатним для експлуатації за низьких температур. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває виробництво зимових та арктичних марок дизельного палива, здатних зберігати необхідні експлуатаційні характеристики в умовах холодного клімату. Крім того, застосування низькотемпературних дизельних палив є доцільним і для помірних кліматичних зон Європи в осінньо-зимовий період, що дозволяє забезпечити стабільну роботу транспортних засобів та паливних систем.

Одними з найважливіших показників якості дизельного палива є його низькотемпературні властивості, зокрема температура помутніння та гранична температура фільтрованості. Саме ці параметри визначають здатність палива зберігати текучість і проходити через паливні фільтри при від'ємних температурах навколишнього середовища. Погіршення низькотемпературних властивостей призводить до кристалізації парафінових вуглеводнів, що може викликати закупорювання паливної системи та порушення роботи двигуна.

Отримання дизельного палива з покращеними низькотемпературними характеристиками є складним технологічним завданням, оскільки воно потребує точного контролю фракційного складу та вмісту нормальних парафінових вуглеводнів. Одним із найбільш ефективних методів покращення властивостей дизельного палива є процес

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		5

каталітичної депарафінізації, який дозволяє зменшити концентрацію високомолекулярних парафінів та забезпечити необхідні експлуатаційні показники палива.

Дослідження у сфері каталітичної депарафінізації активно проводяться у провідних наукових центрах та університетах Європи. Значний внесок у розвиток технологій виробництва екологічно безпечних і низькотемпературних дизельних палив здійснюють наукові колективи Technical University of Denmark, Norwegian University of Science and Technology, RWTH Aachen University, Politecnico di Milano та Delft University of Technology. Їхні роботи спрямовані на вдосконалення каталітичних систем, оптимізацію технологічних режимів процесу та підвищення енергоефективності нафтопереробних установок.

Об'єкт дослідження – процес каталітичної депарафінізації дизельних палив.

Предмет дослідження – закономірності впливу технологічних параметрів процесу, складу сировини та активності каталізатора на ефективність депарафінізації й якість отриманого дизельного палива.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні залежностей між параметрами технологічного режиму, складом сировини та ступенем активності каталізатора під час процесу каталітичної депарафінізації. У роботі також визначено оптимальні умови проведення процесу для різних типів сировини з урахуванням зміни активності каталізатора, що дозволяє підвищити ефективність виробництва низькотемпературних дизельних палив.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості підвищення ефективності роботи промислових установок каталітичної депарафінізації завдяки застосуванню оптимізованих технологічних режимів. Реалізація запропонованих рішень сприятиме покращенню якості

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		6

дизельного палива, зниженню енергетичних витрат виробництва та підвищенню надійності роботи техніки в умовах низьких температур.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Дпк
Змн	Дпк	№ докум	Підпис	Дата		7

## 1. Загальні відомості

### 1.1 Вимоги та характеристики дизельного палива

У сучасних країнах Європи дизельне паливо залишається одним із найбільш поширених видів енергетичних ресурсів для двигунів внутрішнього згорання. Воно широко використовується у вантажному та пасажирському транспорті, сільськогосподарській техніці, залізничному сполученні, морському транспорті, а також у стаціонарних енергетичних установках. Завдяки високій економічності, надійності та паливній ефективності дизельні двигуни продовжують активно застосовуватися як у комерційному секторі, так і в приватному автотранспорті. У багатьох країнах Європейського Союзу автомобілі з дизельними двигунами успішно конкурують із бензиновими аналогами, особливо в сегменті вантажних перевезень і транспорту великої потужності.

Дизельні палива можуть використовуватися не лише у традиційних дизельних двигунах, але й у деяких типах газотурбінних установок та комбінованих енергетичних систем. Залежно від умов експлуатації та конструктивних особливостей двигунів дизельне паливо поділяють на кілька груп. Для швидкохідних двигунів, частота обертання колінчастого вала яких перевищує 800 об/хв, застосовують легкі сорти дизельного палива. Для тихохідних двигунів великої потужності, що працюють у суднових чи промислових установках, використовують важкі види палив із підвищеною в'язкістю.

У країнах Північної та Центральної Європи особливої уваги набуває виробництво зимових та арктичних марок дизельного палива. Це пов'язано з необхідністю забезпечення стабільної роботи техніки в умовах низьких температур навколишнього середовища. Значна частина дизельного палива, що виробляється на європейських нафтопереробних

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		8

підприємствах, призначена для експлуатації в помірному кліматі, однак зі зростанням потреб транспортного сектору збільшується попит і на низькотемпературні марки палив. Особливо актуальним це є для країн Скандинавії, Балтії та північних регіонів Європи, де температура повітря в зимовий період може опускатися до критичних значень.

До сучасних дизельних палив висувається комплекс вимог, які забезпечують економічну, екологічно безпечну та надійну роботу двигунів внутрішнього згоряння. Однією з головних характеристик є здатність палива ефективно розпилюватися та випаровуватися, утворюючи однорідну паливно-повітряну суміш за різних температурних умов. Важливу роль також відіграють фракційний та вуглеводневий склад палива, від яких залежать пускові характеристики двигуна, стабільність процесу згоряння та рівень енергетичної ефективності.

Якісне дизельне паливо повинно забезпечувати максимально повне згоряння з мінімальним утворенням нагару, диму та твердих частинок. Це особливо важливо в умовах сучасних екологічних стандартів, які регламентують викиди шкідливих речовин у атмосферу. Крім того, паливо має володіти достатніми мастильними властивостями для зменшення зношування елементів паливної системи, зокрема плунжерних пар паливних насосів високого тиску.

Однією з ключових вимог до дизельного палива є його стабільність під час транспортування та зберігання. Паливо повинно зберігати свої фізико-хімічні властивості протягом тривалого часу, не викликати корозії металевих елементів паливної системи та не руйнувати гумотехнічні матеріали. Особливо важливими є низькотемпературні характеристики палива, зокрема температура помутніння, температура застигання та гранична температура фільтрованості. Саме ці параметри визначають можливість безперебійного прокачування палива через систему живлення двигуна в зимовий період.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		9

Експлуатаційні вимоги до дизельного палива охоплюють усі етапи його використання — від виробництва та транспортування до безпосереднього застосування в техніці. Під час перевезення трубопровідним, морським, автомобільним чи залізничним транспортом паливо піддається впливу різних температур і зовнішніх факторів. Тому сучасні дизельні палива повинні характеризуватися високою хімічною стабільністю, низьким вмістом води, механічних домішок і корозійно-активних компонентів.

Виробництво дизельних палив також пов'язане з економічними та технологічними вимогами. Нафтопереробні підприємства прагнуть забезпечити максимальний вихід готової продукції при мінімальних енергетичних витратах і високій рентабельності виробництва. Для отримання дизельного палива з покращеними низькотемпературними та екологічними властивостями застосовуються сучасні процеси гідроочищення, деароматизації, ізомеризації та каталітичної депарафінізації. Додатково можуть використовуватися спеціальні депресорні присадки, які покращують текучість палива при низьких температурах.

Виробники дизельного палива орієнтуються на використання різних типів нафтової сировини, що відрізняються за фракційним та вуглеводневим складом. У зв'язку з цим технологічні процеси мають забезпечувати стабільну якість продукції незалежно від походження сировини. При цьому важливим завданням залишається мінімізація використання дорогих присадок та компонентів, які можуть суттєво підвищувати собівартість готового продукту.

Окрему увагу приділяють екологічним характеристикам дизельних палив. Токсичність вихлопних газів значною мірою залежить від вмісту ароматичних, поліциклічних та сірковмісних сполук у паливі. Саме тому сучасні європейські стандарти передбачають жорсткі обмеження щодо

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		

вмісту сірки, ароматичних вуглеводнів і твердих частинок у дизельних паливах. Екологічні вимоги постійно посилюються відповідно до нормативів Європейського Союзу, зокрема стандартів Euro-5 та Euro-6, спрямованих на зниження негативного впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище.

У країнах ЄС якість дизельних палив регламентується міжнародними та європейськими стандартами, серед яких важливе місце займає стандарт EN 590, що визначає основні фізико-хімічні та екологічні показники автомобільного дизельного палива. Дотримання цих вимог забезпечує надійну роботу двигунів, підвищення енергоефективності транспортних засобів та зменшення шкідливих викидів у атмосферу.



Рисунок 1.1 – Дизельне паливо

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		11

## 1.2 Основні показники якості сучасного дизельного палива

До основних показників якості дизельного палива, які нормуються відповідно до сучасних європейських та українських стандартів, належать: цетанове число або цетановий індекс, густина при температурі 15 °С або 20 °С, фракційний склад, кінематична в'язкість, мастильні властивості, низькотемпературні характеристики, температура спалаху в закритому тиглі, вміст сірки та сірковмісних сполук, концентрація ароматичних і поліциклічних ароматичних вуглеводнів, окиснювальна стабільність, вміст води, механічних домішок, зольність, кислотність, коксовий залишок та інші фізико-хімічні параметри. У разі використання біокомпонентів додатково визначають вміст метилових ефірів жирних кислот, що входять до складу палива.

Одним із найважливіших показників дизельного палива є цетанове число, яке характеризує здатність палива до самозаймання після впорскування у стиснене повітря камери згоряння. Від цього параметра залежать легкість запуску двигуна, плавність його роботи, витрата палива та рівень утворення димності у вихлопних газах. Підвищення цетанового числа сприяє скороченню затримки займання, унаслідок чого робота дизельного двигуна стає більш стабільною та м'якою. Разом із тим надмірно високі значення цетанового числа можуть негативно впливати на економічність двигуна та спричинити збільшення кількості твердих частинок у продуктах згоряння.

Значення цетанового числа значною мірою залежить від хімічного складу дизельного палива. Найкращими показниками самозаймання характеризуються нормальні парафінові вуглеводні. Зі збільшенням довжини їх молекулярного ланцюга цетанове число, як правило, зростає. У розгалужених ізопарафінових сполук цей показник є дещо нижчим. Ароматичні вуглеводні, особливо без бічних ланцюгів, мають найменшу

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		12

здатність до самозаймання. Нафтові вуглеводні займають проміжне положення між парафіновими та ароматичними сполуками. Загалом можна зазначити, що чим вищий вміст водню у співвідношенні до вуглецю, тим кращими є характеристики займання дизельного палива.

Таким чином, за здатністю до самозаймання вуглеводні можна розташувати у такій послідовності: нормальні парафіни → ізопарафіни → нафтени → ароматичні вуглеводні.

У європейській та українській практиці нафтопереробки для оцінки цетанового числа прийнято використовувати умовну шкалу, у якій еталонним паливом із максимальним значенням вважається цетан, а найнижчим показником характеризуються ароматичні сполуки типу метилнафталіну. Цетанове число визначається шляхом порівняння досліджуваного палива зі стандартними еталонними сумішами, що мають аналогічні характеристики займання.

Не менш важливим показником є густина дизельного палива, яка нормується при температурі 15 °С або 20 °С. Вона впливає на процеси сумішоутворення, випаровування та повноту згоряння палива у двигуні. Найвищу густину мають ароматичні вуглеводні, тоді як парафінові характеризуються нижчими значеннями. Нафтові сполуки займають проміжне положення. Як правило, важчі фракції дизельного палива мають більшу густину та підвищену в'язкість.

Паливо з нижчою густиною краще розпилюється форсунками, швидше змішується з повітрям та забезпечує більш повне згоряння, що позитивно впливає на економічність роботи двигуна та зменшує димність вихлопних газів. Однак надто низька густина може супроводжуватися недостатньою в'язкістю та зниженим цетановим числом, що негативно впливає на роботу паливної апаратури.

Важливе значення для роботи дизельного двигуна має фракційний склад палива, який визначає температуру випаровування окремих його

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		13

компонентів. Легші фракції швидше випаровуються та сприяють кращому сумішоутворенню, однак надмірне зниження температури кипіння може викликати жорстке згоряння та підвищення тиску у циліндрах двигуна. У разі збільшення частки важких фракцій спостерігається погіршення розпилення палива, підвищення його в'язкості та збільшення утворення сажі й димності через неповне згоряння.

Витрата дизельного палива значною мірою залежить від температури википання окремих фракцій. Особливе значення має температура перегонки 50 % об'єму палива, яка характеризує його випаровуваність на перехідних режимах роботи двигуна. Чим вищою є ця температура, тим повільніше відбувається випаровування палива та тим більшою стає його витрата.

Фракційний склад також впливає на інші властивості дизельного палива, зокрема на густину, в'язкість, температуру застигання, температуру спалаху та вміст смолистих речовин. Саме тому контроль фізико-хімічних характеристик палива є необхідною умовою забезпечення ефективної, економічної та екологічно безпечної роботи сучасних дизельних двигунів відповідно до вимог українських і європейських стандартів якості.

Фракційний склад дизельного палива визначають відповідно до сучасних українських та європейських стандартів випробувань, оскільки саме цей показник суттєво впливає на процеси випаровування, сумішоутворення та повноту згоряння палива у двигуні.

Однією з важливих характеристик дизельного палива є кінематична в'язкість, яка безпосередньо впливає на протизношувальні властивості, ефективність прокачування паливною системою та якість розпилення форсунками. Значення в'язкості визначається хімічним і фракційним складом палива та підбирається таким чином, щоб забезпечити оптимальне поєднання мастильних властивостей, текучості та здатності до розпилення.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		14

Підвищення в'язкості призводить до збільшення гідравлічного опору у паливній системі, погіршення дисперсності розпилення та зниження ефективності роботи паливного насоса високого тиску. Водночас надмірне зменшення в'язкості може спричинити витікання палива через зазори плунжерних пар і погіршення змащування елементів паливної апаратури. Саме тому для сучасних дизельних палив встановлюються як мінімальні, так і максимальні допустимі значення кінематичної в'язкості.

У країнах Європейського Союзу та в Україні для оцінки протизношувальних характеристик дизельного палива, окрім в'язкості, додатково контролюють мастильну здатність. Вона оцінюється за величиною діаметра плями зношування при стандартних умовах випробування. Цей показник залежить не лише від в'язкості, а й від вуглеводневого складу палива, наявності сірковмісних сполук та спеціальних протизношувальних присадок.

Сірковмісні сполуки певною мірою покращують мастильні властивості дизельного палива завдяки утворенню на поверхнях тертя захисних плівок із сульфідів та оксидів металів. Такі плівки знижують коефіцієнт тертя та підвищують зносостійкість деталей паливної системи. Однак сучасні екологічні вимоги Європейського Союзу передбачають суттєве обмеження вмісту сірки у паливі. У результаті глибокого гідроочищення зменшується кількість активних сірковмісних компонентів, а отже, погіршується природна мастильна здатність дизельного палива. Саме тому виробники широко застосовують спеціальні протизношувальні присадки.

На мастильні властивості впливає і склад ароматичних вуглеводнів. Найкращу мастильну здатність мають поліциклічні ароматичні сполуки, тоді як моноциклічні ароматичні вуглеводні характеризуються меншою ефективністю. Водночас надмірний вміст ароматичних сполук є

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		15

небажаним через їх токсичність та негативний вплив на екологічні характеристики палива.

До найважливіших експлуатаційних характеристик дизельного палива належать його низькотемпературні властивості. Основними показниками є температура помутніння, температура застигання та гранична температура фільтрованості.

Температура застигання визначає момент, при якому паливо втрачає текучість та перестає переміщуватися під дією власної ваги. Цей параметр є особливо важливим під час транспортування та зберігання палива у зимових умовах.

Температура помутніння характеризує початок кристалізації нормальних парафінових вуглеводнів у паливі. У цей момент паливо втрачає прозорість через утворення мікрочастин парафіну. Гранична температура фільтрованості визначає найнижчу температуру, за якої паливо ще здатне проходити через паливний фільтр без втрати працездатності системи живлення двигуна.

Для дизельних палив без депресорних присадок гранична температура фільтрованості зазвичай лише на декілька градусів нижча за температуру помутніння. У паливі з депресорними присадками ця різниця може становити понад 10 °С, що значно покращує експлуатаційні характеристики у зимовий період.

Низькотемпературні властивості значною мірою залежать від фракційного та вуглеводневого складу дизельного палива. Зі збільшенням молекулярної маси вуглеводнів підвищуються температура помутніння та температура застигання. Високий вміст нормальних парафінів погіршує низькотемпературні характеристики, тоді як ізопарафінові, нафтеніві та частково ароматичні вуглеводні сприяють їх покращенню.

Важливим показником безпеки є температура спалаху дизельного палива, яка характеризує його пожежонебезпечність під час зберігання та

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ доквм	Пілпис	Дата		16

використання. Чим нижча температура спалаху, тим вищий ризик займання парів палива.

Суттєвий вплив на якість дизельного палива має вміст сірки та сірковмісних сполук. Вони можуть викликати корозію елементів паливної системи та сприяти утворенню оксидів сірки під час згоряння палива. Ці оксиди негативно впливають на навколишнє середовище, спричиняючи кислотні дощі та забруднення атмосфери. Саме тому сучасні європейські екологічні стандарти значно обмежують допустимий вміст сірки у дизельних паливах.

Контроль вмісту ароматичних та поліциклічних ароматичних вуглеводнів став особливо важливим у зв'язку з посиленням екологічних вимог у Європі та Україні. Такі сполуки характеризуються токсичністю та канцерогенними властивостями, а також сприяють утворенню нагару та підвищенню димності вихлопних газів.

Корозійна активність дизельного палива оцінюється спеціальними випробуваннями на мідній пластинці. Якісне паливо не повинно викликати корозійного руйнування металевих елементів паливної системи та деталей двигуна.

Важливим показником є також вміст смолистих речовин, які впливають на нагароутворення та появу коксових відкладень у форсунках і камерах згоряння. Надмірна кількість смол призводить до порушення процесу розпилення палива та локальних перегрівів деталей двигуна.

Окиснювальна стабільність характеризує здатність дизельного палива зберігати свої властивості під час тривалого зберігання. У сучасних умовах до складу палив часто входять компоненти вторинної переробки нафти, які містять ненасичені вуглеводні та гетероатомні сполуки. Вони здатні до окиснення та полімеризації, унаслідок чого утворюються смоли й осади.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		17

Наявність води у дизельному паливі негативно впливає на його теплотворну здатність, корозійну активність та низькотемпературні властивості. За низьких температур вода може утворювати кристали льоду, що порушують роботу паливної системи.

Механічні домішки та загальне забруднення дизельного палива є причиною абразивного зношування деталей двигуна та засмічення форсунок і фільтрів. Саме тому сучасні стандарти передбачають суворий контроль чистоти палива.

Під час згоряння дизельного палива можуть утворюватися зольні залишки, що спричиняють підвищене зношування деталей двигуна та накопичення нагару у камері згоряння і вихлопній системі. Тому зольність дизельного палива жорстко регламентується.

Йодне число характеризує вміст ненасичених вуглеводнів і дозволяє оцінити хімічну стабільність палива. Кислотність визначає концентрацію органічних кислот та є показником корозійної активності палива під час зберігання й експлуатації.

Коксоутворювальна здатність дизельного палива оцінюється за величиною коксового залишку після перегонки. Коксові відкладення погіршують роботу форсунок, клапанів та інших елементів двигуна, викликаючи локальні перегриви та зниження ефективності роботи силової установки.

Таким чином, контроль фізико-хімічних, експлуатаційних та екологічних показників дизельного палива є необхідною умовою забезпечення надійної, економічної та екологічно безпечної роботи сучасних дизельних двигунів відповідно до вимог українських та європейських стандартів якості.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		18

### 1.3 Виробництво та застосування зимових та арктичних марок дизельного палива

Частка дизельного палива, що виробляється в країнах Європи та Україні для експлуатації в умовах холодного клімату, постійно зростає у зв'язку з підвищенням потреб транспортного, енергетичного та промислового секторів. Особливо актуальним є виробництво низькотемпературних марок дизельного палива для країн Північної та Східної Європи, де у зимовий період спостерігаються значні зниження температури навколишнього середовища. Крім того, розвиток транспортної інфраструктури, морських перевезень, логістичних маршрутів та енергетичних проєктів у північних регіонах Європи обумовлює необхідність збільшення обсягів виробництва зимового та арктичного дизельного палива.

Погіршення низькотемпературних властивостей дизельного палива пов'язане насамперед із наявністю у його складі нормальних і слабкорозгалужених парафінових вуглеводнів, а також деяких нафтових сполук із довгими бічними ланцюгами. За низьких температур ці компоненти здатні утворювати кристали парафіну, які накопичуються у паливній системі, погіршують фільтрованість та можуть повністю блокувати подачу палива до двигуна. У результаті порушується стабільність роботи техніки, ускладнюється запуск двигуна та зростає ризик відмови паливної апаратури.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		19



Рисунок 1.2 Завод з виробництва дизельного палива

Для покращення низькотемпературних характеристик дизельного палива у сучасній нафтопереробці застосовується широкий спектр фізико-хімічних і каталітичних методів. Одним із найпростіших способів є зниження температури кінця кипіння дизельного палива шляхом повторної перегонки або змішування з легшими фракціями, зокрема керосиновими компонентами. Також можливе виділення спеціальних вузьких фракцій із температурним інтервалом приблизно 140–300 °С. Однак такий підхід супроводжується зниженням виходу готового продукту та підвищенням пожежонебезпечності палива.

Досить поширеним методом є використання депресорних присадок та диспергаторів парафінів. Ці речовини дозволяють знижувати температуру застигання та покращувати прокачуваність дизельного палива при низьких температурах. Проте ефективність депресорних присадок щодо зниження температури помутніння є обмеженою, тому їх застосування не завжди забезпечує необхідні характеристики арктичних

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		20

палив. У країнах Європейського Союзу широко використовуються сучасні імпорتنі пакети присадок, розроблені провідними хімічними компаніями для відповідності стандартам EN 590 та екологічним вимогам Euro-5 і Euro-6.

Одним із перспективних методів є електродепарафінація, що передбачає часткове видалення високомолекулярних нормальних парафінів за допомогою електричного поля. Цей процес зазвичай поєднується із застосуванням депресорних присадок і дозволяє покращити низькотемпературні характеристики палива приблизно на 10–15 °С. Проте через складність технологічної реалізації цей метод поки що не набув широкого промислового поширення.

Метод низькотемпературної кристалізаційної депарафінації базується на зниженні розчинності парафінових вуглеводнів під час охолодження паливної сировини. У процесі охолодження парафіни кристалізуються та видаляються шляхом фільтрації або центрифугування. Незважаючи на ефективність цього методу, його недоліком є зменшення виходу готового дизельного палива та значні енергетичні витрати.

Ще одним способом є карбамідна депарафінація, яка ґрунтується на здатності нормальних парафінів утворювати з карбамідом нерозчинні комплекси. Така технологія дозволяє знизити температуру застигання палива, однак повне видалення високомолекулярних парафінів при цьому не досягається. Крім того, процес характеризується складністю регенерації реагентів та значною матеріалоємністю.

У ряді європейських досліджень розглядається також екстракційна депарафінація, заснована на використанні селективних розчинників, які дозволяють відокремлювати високо- та низькоплавкі компоненти дизельного палива. Проте цей метод вважається енергоємним, складним у реалізації та екологічно небажаним через використання токсичних розчинників.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		21

Для селективного вилучення парафінових сполук можуть використовуватися адсорбційні методи із застосуванням активованого вугілля, цеолітів та молекулярних сит. Такі сорбенти здатні вибірково поглинати компоненти, що погіршують низькотемпературні властивості палива. Однак через високу вартість сорбентів і складність їх регенерації метод має обмежене промислове застосування.

Найбільш ефективними та технологічно перспективними сьогодні вважаються каталітичні процеси гідрокрекінгу, ізомеризації та каталітичної депарафінізації. Їх суть полягає у зміні структури вуглеводнів дизельного палива, внаслідок чого нормальні парафіни перетворюються на ізопарафінові сполуки з кращими низькотемпературними властивостями. Завдяки цьому знижуються температура застигання, температура помутніння та гранична температура фільтрованості палива без істотного зменшення виходу готової продукції.

Особливу увагу в Європі приділяють розвитку біодизельного палива, яке отримують із рослинних олій та інших відновлюваних джерел сировини. Біодизель характеризується високим цетановим числом і зменшеними викидами шкідливих речовин у атмосферу. Використання такого палива дозволяє знизити залежність від викопних енергоресурсів та покращити екологічні показники транспорту. Разом із тим масове впровадження біодизеля стримується високою собівартістю виробництва, необхідністю модернізації паливних систем двигунів та складністю забезпечення стабільних низькотемпературних характеристик.

Незважаючи на різноманіття існуючих технологій, нафтопереробні підприємства України та країн Європейського Союзу найчастіше застосовують комбінацію каталітичної депарафінізації, використання депресорних присадок та регулювання фракційного складу палива. Саме ці методи дозволяють забезпечити оптимальне поєднання економічної

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		22

ефективності, високої якості дизельного палива та відповідності сучасним екологічним стандартам.

Каталітична депарафінізація має важливу перевагу над іншими методами, оскільки в її основі лежать хімічні перетворення вуглеводнів, а не лише фізичне видалення парафінів. Завдяки цьому стає можливим залучення до переробки більш важких нафтових фракцій, що сприяє збільшенню виходу низькотемпературних палив та підвищенню ефективності роботи сучасних нафтопереробних комплексів.

#### **1.4 Цілі та завдання кваліфікаційної роботи**

Аналіз науково-технічної літератури та сучасних досліджень показав, що дизельне паливо залишається одним із найважливіших продуктів нафтопереробної промисловості як в Україні, так і в країнах Європейського Союзу. Високий попит на дизельне паливо пояснюється його широким використанням у транспортному секторі, сільському господарстві, морських перевезеннях, енергетиці та промисловості. Особливої актуальності набуває виробництво зимових і арктичних марок дизельного палива, що забезпечують стабільну роботу техніки в умовах низьких температур навколишнього середовища.

У сучасній європейській нафтопереробці спостерігається тенденція активного впровадження процесів каталітичної депарафінізації як ефективної альтернативи традиційним некаталітичним методам покращення низькотемпературних властивостей дизельного палива. Це пов'язано з тим, що фізичні методи депарафінізації мають низку суттєвих недоліків, серед яких високі енергетичні витрати, значне зменшення виходу готового продукту, складність технологічного обладнання та обмежена ефективність при переробці важкої нафтової сировини.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		23

Однією з головних причин розвитку процесів каталітичної депарафінації є зміна структури світової нафтової сировини. Упродовж останніх десятиліть у багатьох країнах Європи та світу спостерігається зменшення частки легких нафт із високим вмістом нафтових вуглеводнів та збільшення обсягів видобутку важких і високопарафіністих нафтових сумішей. Високомолекулярні нормальні парафіни, що містяться у важких та середньодистилятних фракціях, значно погіршують низькотемпературні властивості дизельного палива. За зниження температури вони першими кристалізуються, утворюючи тверді парафінові структури, які ускладнюють фільтрацію палива та можуть призводити до порушення роботи паливної системи двигуна.

У зв'язку з цим процес каталітичної депарафінації набуває все більшого значення, оскільки дозволяє не просто видаляти небажані парафінові компоненти, а здійснювати їх хімічне перетворення у більш стабільні ізопарафінові структури. Такий підхід забезпечує суттєве покращення низькотемпературних характеристик дизельного палива без значного зменшення виходу цільового продукту.

Важливою перевагою каталітичної депарафінації є її економічна ефективність порівняно з іншими процесами глибокої переробки нафти, такими як гідрокрекінг або каталітичний крекінг. Процес здійснюється за більш м'яких технологічних умов, характеризується нижчими капітальними та експлуатаційними витратами, а також дозволяє інтегрувати депарафінацію з установками гідроочищення. Це значно спрощує модернізацію існуючих нафтопереробних підприємств та підвищує ефективність використання виробничих потужностей.

Проведений огляд літературних джерел свідчить, що сучасні наукові дослідження у сфері каталітичної депарафінації переважно спрямовані на вдосконалення каталітичних систем, розробку нових цеолітичних каталізаторів, підвищення їх активності, селективності та стабільності.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		24

Значна увага приділяється також вивченню механізмів ізомеризації та гідрогенлізу парафінових вуглеводнів. Водночас питання математичного моделювання, оптимізації технологічних режимів та аналізу роботи діючих промислових установок залишаються недостатньо дослідженими, особливо в умовах зміни складу сировини та поступової дезактивації каталізаторів.

У країнах Європейського Союзу активно впроваджуються цифрові технології управління нафтопереробними процесами, що дозволяє використовувати математичні моделі для прогнозування поведінки технологічних систем, оцінки впливу параметрів процесу та підвищення енергоефективності виробництва. Використання комп'ютерного моделювання дає можливість значно скоротити витрати на проведення промислових експериментів, підвищити точність регулювання процесу та забезпечити стабільну якість дизельного палива.

Таким чином, метою даного дослідження є підвищення ефективності процесу каталітичної депарафінізації дизельного палива шляхом використання методів математичного моделювання та оптимізації технологічних параметрів.

Для досягнення поставленої мети у роботі виконано аналіз сучасних технологій виробництва низькотемпературних дизельних палив, досліджено закономірності процесу каталітичної депарафінізації, проведено оцінку впливу температури, тиску, швидкості подачі сировини та активності каталізатора на характеристики отриманого продукту. Крім того, здійснено математичне моделювання процесу та розроблено рекомендації щодо оптимізації технологічного режиму роботи установки з урахуванням вимог сучасних українських та європейських стандартів якості дизельного палива.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		25

## 2. Об'єкт та методи досліджень

### 2.1 Основні технологічні параметри процесу депарафінації

Об'єктом даного дослідження є процес каталітичної депарафінації дизельних палив, який застосовується на сучасних нафтопереробних підприємствах для покращення низькотемпературних характеристик паливних продуктів. Цей процес належить до перспективних технологій глибокої переробки нафтової сировини та відіграє важливу роль у виробництві зимових і арктичних марок дизельного палива, що відповідають сучасним екологічним та експлуатаційним вимогам.

Основною метою процесу каталітичної депарафінації є зниження температури застигання дизельного палива та покращення його фільтрованості при низьких температурах навколишнього середовища. У результаті проведення процесу забезпечується отримання дизельного палива з температурою застигання приблизно від мінус 18 °С до мінус 68 °С залежно від складу сировини, умов процесу та типу використовуваного каталізатора. Це дозволяє використовувати паливо в умовах помірного, холодного та арктичного клімату без порушення роботи паливної системи двигунів.

Суть процесу каталітичної депарафінації полягає у хімічному перетворенні нормальних парафінових вуглеводнів, які мають високі температури кристалізації, у більш розгалужені ізопарафінові сполуки або у легші вуглеводні. Завдяки цьому значно покращуються низькотемпературні властивості дизельного палива, зменшується утворення парафінових кристалів та підвищується стабільність роботи техніки при низьких температурах.

Процес здійснюється у присутності спеціальних цеолітних або металовмісних каталізаторів за підвищених температур і тиску в

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		26

середовищі водню. Важливими перевагами каталітичної депарафінації є можливість переробки важких нафтових фракцій, відносно невисокі енергетичні витрати та сумісність із процесами гідроочищення, що широко застосовуються на сучасних нафтопереробних заводах України та країн Європейського Союзу.

На рисунку 2.1 наведено принципову схему реактора процесу каталітичної депарафінації дизельних палив, у якому відбуваються основні фізико-хімічні перетворення вуглеводнів нафтової сировини під дією каталізатора та водневого середовища.

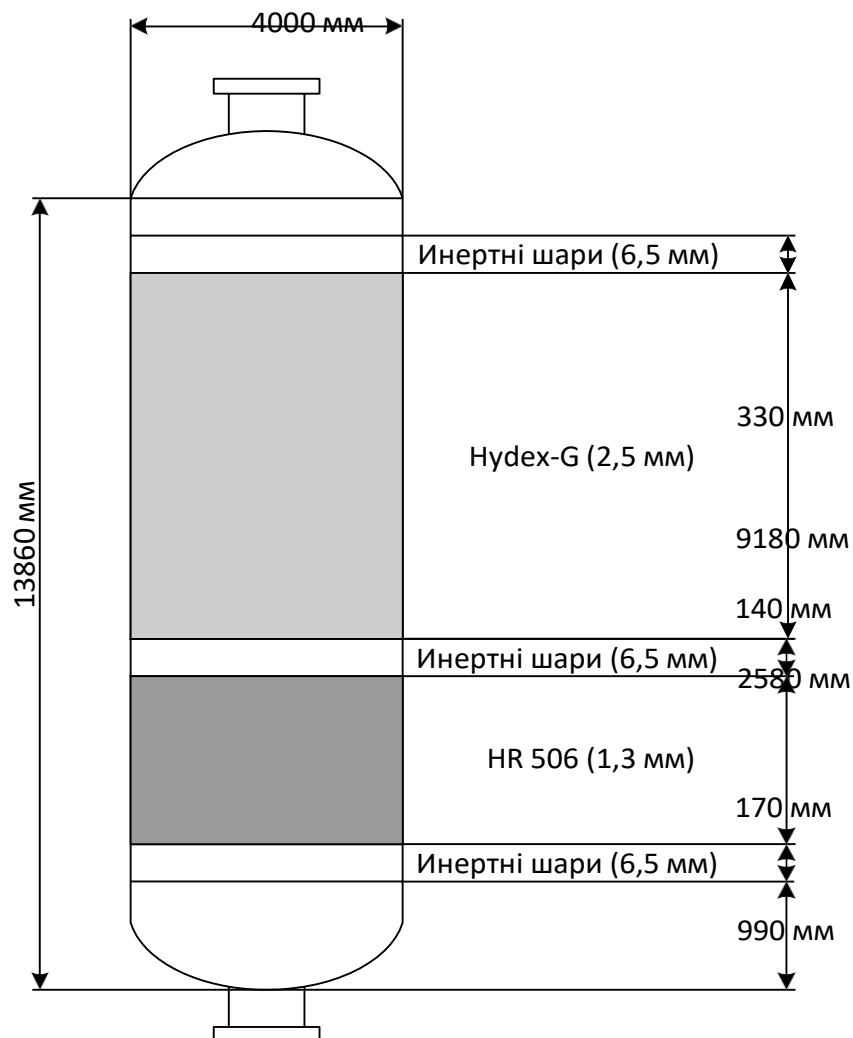


Рисунок 2.1 – Схема реактора процесу каталітичної депарафінації

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Дпк
Змн	Дпк	№ док.м	Підпис	Дата		27

Промисловий реактор процесу каталітичної депарафінації являє собою вертикальний циліндричний апарат колонного типу, у якому реалізується контакт нафтової сировини з каталізатором у потоці водневмісного газу. Подавання сировини здійснюється за аксіальною схемою, що забезпечує рівномірний розподіл потоку по перерізу реактора та стабільні умови перебігу хімічних реакцій у каталізаторному шарі.

У нижній частині реактора розміщується шар інертних керамічних кульок діаметром близько 19 мм, які виконують функцію опорного та дренажного шару. Над ним розташовується додатковий шар інертних кульок меншого розміру — приблизно 6,4 мм. Таке компонування забезпечує рівномірний розподіл потоку сировини, запобігає винесенню каталізатора та сприяє зниженню гідравлічного опору всередині апарата.

Вище шару інертного матеріалу розташовується шар гідроочисного каталізатора типу Со–Мо з розміром гранул близько 1,2 мм. Основне призначення цього каталізатора полягає у видаленні сірковмісних, ненасичених та кисневмісних сполук, а також меркаптанів, які можуть негативно впливати на активність каталізатора депарафінації. Проведення попередньої гідроочистки дозволяє підвищити стабільність роботи установки, зменшити швидкість дезактивації каталізатора та покращити якість кінцевих продуктів.

Для розділення шарів каталізаторів між секціями гідроочищення та депарафінації передбачено додатковий прошарок інертних кульок діаметром приблизно 6,4 мм. Він забезпечує стабілізацію потоку, рівномірний розподіл температури та запобігає змішуванню каталізаторних шарів під час експлуатації установки.

У верхній частині реактора розміщується основний каталізатор процесу депарафінації з розміром частинок близько 2,5 мм. Саме в цьому шарі відбуваються основні реакції ізомеризації та часткового гідрокрекінгу нормальних парафінових вуглеводнів, унаслідок чого покращуються

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		28

низькотемпературні властивості дизельного палива. Висота промислового реактора становить приблизно 13,7 м, а внутрішній діаметр — близько 4 м, що забезпечує необхідну продуктивність установки та ефективний тепло- і масообмін у процесі роботи.

Сировиною процесу каталітичної депарафінації можуть бути атмосферний газойль, прямогонна дизельна фракція або їх суміші у різних співвідношеннях. У деяких випадках до складу сировини додатково вводять бензинові фракції процесів термічної переробки, зокрема бензин вісбрекінгу. Щільність сировини зазвичай знаходиться в межах 830–870 кг/м<sup>3</sup>, а масова частка сірки не перевищує 1,5 %. Включення додаткових компонентів дозволяє регулювати склад сировини та оптимізувати характеристики готового дизельного палива.

У процесі каталітичної депарафінації утворюється декілька цільових та побічних продуктів. До основних продуктів належать гідроочищені дизельні фракції різних температурних інтервалів кипіння. Фракція 180–240 °С використовується як компонент високоякісного дизельного палива з низьким вмістом сірки. Фракція 240–340 °С також застосовується у виробництві дизельних палив і характеризується покращеними експлуатаційними властивостями. Важка фракція з температурою кипіння понад 340 °С може використовуватися як компонент дизельного палива або котельного палива.

Під час процесу також утворюється стабільний бензин із низьким вмістом сірки, який використовується як компонент сировини установок каталітичного риформінгу або для виробництва автомобільних бензинів. Легкі бензинові фракції застосовують як сировину для процесів ізомеризації, стабілізації та вторинної перегонки бензинових компонентів. Крім рідких продуктів, у процесі формується сухий вуглеводневий газ, який може використовуватися як компонент паливного газу на підприємстві.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		29

Ефективність процесу каталітичної депарафінізації значною мірою залежить від дотримання оптимального технологічного режиму. До основних параметрів процесу належать температура реакції, тиск, кратність циркуляції водневмісного газу, швидкість подачі сировини та активність каталізатора. Контроль цих параметрів дозволяє забезпечити стабільну роботу установки, високу селективність процесу та отримання дизельного палива, що відповідає сучасним українським та європейським стандартам якості.

У таблиці 2.1 наведено основні нормативні параметри технологічного режиму процесу каталітичної депарафінізації відповідно до регламенту роботи промислової установки.

Таблиця 2.1 – Норми технологічного процесу каталітичної депарафінізації

Показник режиму	Одиниця вимірювання	Межі технологічних параметрів
Тиск на вході	МПа	не більше 8,6
Перепад тиску в реакторі	МПа	не більше 0,5
Температура на вході	°C	320 – 400
Температура в каталітичному шарі	°C	320 – 400
Температура зовнішньої стінки каталізатора	°C	не більше 410
Витрата газу в реакторі	м <sup>3</sup> /ч	не більше 34300

## 2.2 Опис математичної моделі та комп'ютерної системи імітаційного моделювання процесу каталітичної депарафінізації

У якості математичної основи дослідження використано формалізовану схему хімічних перетворень, яка описує перебіг процесу каталітичної депарафінізації на біфункціональному каталізаторі. Розроблена математична модель є достатньо інформативною з точки зору відображення механізму реакцій та дозволяє враховувати особливості перетворення різних груп вуглеводнів залежно від кількості атомів Карбону в їх молекулах, молекулярної будови та реакційної здатності компонентів сировини.

Запропонований рівень формалізації процесу забезпечує адекватний опис як основних цільових реакцій ізомеризації нормальних парафінів, так і побічних реакцій гідрокрекінгу, гідрування та утворення легких фракцій. Це дозволяє більш точно оцінювати зміни складу сировини під час проходження через каталізаторний шар та прогнозувати фізико-хімічні властивості кінцевих продуктів.

Особливістю побудованої математичної моделі є поєднання достатньої точності опису технологічного процесу із відносно невеликою розмірністю системи рівнянь. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити кількість експериментальних параметрів, необхідних для ідентифікації моделі, спростити проведення обчислень та скоротити витрати часу на комп'ютерне моделювання. Водночас модель зберігає високу чутливість до зміни складу сировини, технологічних параметрів та активності каталізатора.

Розроблена модель враховує вплив температури, тиску, швидкості подачі сировини, співвідношення водню до вуглеводневої сировини та ступеня дезактивації каталізатора на глибину перетворення парафінових

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		31

вуглеводнів. Це забезпечує можливість прогнозування виходу окремих фракцій, зміни температури застигання, температури помутніння та інших експлуатаційних характеристик дизельного палива.

Використання математичного моделювання у процесі каталітичної депарафінізації дає змогу аналізувати поведінку технологічної системи без проведення великої кількості промислових експериментів, що є особливо важливим для сучасних нафтопереробних підприємств України та країн Європейського Союзу. Отримана модель може бути використана для оптимізації режимів роботи установки, підвищення ефективності виробництва низькотемпературних дизельних палив та забезпечення стабільної якості готової продукції відповідно до сучасних екологічних стандартів.

На основі розробленої формалізованої схеми хімічних перетворень була створена кінетична модель процесу каталітичної депарафінізації дизельних палив. Побудована модель описує зміну концентрацій основних груп вуглеводневих компонентів у часі та представлена у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь із заданими початковими умовами. Такий підхід дозволяє математично відтворити перебіг фізико-хімічних процесів, що відбуваються у реакторі під час взаємодії нафтової сировини з каталізатором у водневому середовищі.

Кінетична модель враховує перетворення нормальних парафінових вуглеводнів, реакції ізомеризації, гідрокрекінгу, утворення легких фракцій, а також перебіг побічних реакцій, які впливають на склад і властивості кінцевого продукту. Це забезпечує можливість аналізу зміни компонентного складу сировини залежно від технологічних параметрів процесу та активності каталізатора.

Під час розроблення математичного опису процесу було прийнято припущення про гомогенний характер реакційного середовища. Відповідно до цього припущення вважається, що концентрації реагуючих

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		32

компонентів рівномірно розподілені в об'ємі реакційної системи, а дифузійні обмеження не мають визначального впливу на швидкість перебігу реакцій. Таке спрощення дозволяє суттєво знизити складність математичної моделі та зробити її придатною для проведення інженерних розрахунків і комп'ютерного моделювання.

Швидкості хімічних реакцій у моделі визначаються відповідно до закону діючих мас, згідно з яким швидкість кожної реакції залежить від концентрацій реагуючих компонентів та кінетичних констант процесу. Використання цього підходу забезпечує адекватний опис перебігу основних хімічних перетворень у реакторі каталітичної депарафінізації та дозволяє оцінювати вплив температури, тиску, складу сировини та технологічного режиму на характеристики отриманого дизельного палива.

Розроблена кінетична модель може бути використана для прогнозування виходу цільових продуктів, визначення оптимальних параметрів процесу та підвищення ефективності роботи промислових установок. Крім того, застосування математичного моделювання дає можливість скоротити обсяг експериментальних досліджень, знизити витрати на проведення випробувань та забезпечити стабільну якість дизельного палива відповідно до сучасних українських та європейських стандартів.

У таблиці 2.2 наведено математичні вирази для швидкостей реакцій процесу каталітичної депарафінізації, записані відповідно до прийнятої кінетичної моделі та закону діючих мас.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ док.м	Пілпис	Дата		33

Таблиця 2.2 – Рівняння швидкостей реакції процесів депарафінізації

№	Реакція	Пряма реакція	зворотня реакція
Процесс депарафинизации			
1.	Гідрокрекінг н-парафінів C <sub>10</sub> –C <sub>27</sub>	$W_1 = k_1 \cdot C_{n-PC} \cdot C_V$	–
2.	Дегідрування н-парафінів C <sub>5</sub> –C <sub>9</sub>	$W_2 = k_2 \cdot C_{n-PC} \cdot C_V$	$W_{-2} = k_{-2} \cdot C_{Ol} \cdot C_V$
3.	Ізомерізація олефінів	$W_3 = k_3 \cdot C_{Ol} \cdot C_V$	$W_{-3} = k_{-3} \cdot C_{i-P}$
4.	Циклізація н-парафінів	$W_4 = k_4 \cdot C_{i-P}$	$W_{-4} = k_{-4} \cdot C_{Naft} \cdot C_V$
5.	Гідрування моноароматичних вуглеводів	$W_5 = k_5 \cdot C_{MAY} \cdot C_V^3$	$W_{-5} = k_{-5} \cdot C_{Naft}$
6.	Гідрування поліароматичних вуглеводів	$W_6 = k_6 \cdot C_{PAY} \cdot C_V$	$W_{-6} = k_{-6} \cdot C_{MAY}^2$
7.	Утворення коксу	$W_7 = k_7 \cdot C_{PAY}$	–
8.	Утворення маркаптанів	$W_8 = k_8 \cdot C_{Ol} \cdot C_{SV}$	–
9.	Гідрування маркаптанів	$W_9 = k_9 \cdot C_{Merk} \cdot C_V^2$	–

Для практичного використання математичної моделі процесу каталітичної депарафінізації в умовах промислового виробництва необхідною є її реалізація у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення. Така комп'ютерна система повинна забезпечувати можливість ефективного використання моделі як розробниками та дослідниками, так і технологічним персоналом підприємства, зацікавленим у підвищенні енергоефективності, стабільності та економічної ефективності роботи установки.

Програмний продукт, створений на основі математичної моделі процесу каталітичної депарафінізації, має відповідати комплексу сучасних технічних та функціональних вимог. Насамперед система повинна забезпечувати високу точність розрахунків технологічних параметрів і характеристик продуктів процесу. Важливою вимогою є також можливість виконання прогнозних розрахунків, аналізу впливу режимних параметрів та оптимізації роботи промислової установки каталітичної депарафінізації.

Реалізація таких функцій стає можливою завдяки тому, що математична модель базується на фізико-хімічних закономірностях перебігу реакцій у реакторі та враховує вплив складу сировини, температури, тиску, активності каталізатора й інших технологічних факторів.

Окрім точності розрахунків, програмний комплекс повинен характеризуватися системністю, універсальністю та можливістю адаптації до різних умов експлуатації. У зв'язку з цим комп'ютерна моделююча система розробляється як єдиний інтегрований програмний комплекс, який поєднує базу даних, базу знань та модулі математичного моделювання і чисельних розрахунків. Такий підхід дозволяє забезпечити централізоване зберігання інформації, автоматизацію обчислень та оперативне оновлення параметрів моделі.

Для процесу каталітичної депарафінізації була розроблена комп'ютерна моделююча система, яка відповідає зазначеним вимогам та забезпечує ефективну підтримку прийняття технологічних рішень. Структура системи включає декілька взаємопов'язаних функціональних блоків.

Першим елементом є база даних, яка містить інформацію про фізико-хімічні властивості потоків, зокрема густину, молекулярну масу, фракційний та компонентний склад сировини, водневмісного газу та продуктів реакції. Також база даних включає термодинамічні характеристики хімічних реакцій, серед яких теплові ефекти, зміна енергії Гіббса та інші параметри, необхідні для моделювання процесу. Крім цього, у системі зберігаються кінетичні параметри реакцій: енергії активації, передекспоненціальні множники рівняння Арреніуса, константи швидкостей прямих і зворотних реакцій.

Другим функціональним елементом системи є експертна база знань, яка накопичує інформацію щодо особливостей експлуатації установки, рекомендацій з вибору технологічних режимів та результатів попередніх

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		35

розрахунків і досліджень. Використання бази знань дозволяє підвищити ефективність аналізу технологічних ситуацій та забезпечити підтримку прийняття рішень оператором або інженером-технологом.

Третім основним компонентом є програмний модуль, який реалізує чисельні методи розв'язання системи рівнянь математичної моделі процесу. За допомогою цього модуля виконується розрахунок зміни концентрацій компонентів, прогнозування виходу продуктів, оцінка низькотемпературних властивостей дизельного палива та оптимізація режимних параметрів процесу.

Під час роботи з програмним забезпеченням користувач взаємодіє із системою через графічний інтерфейс, вводить необхідні вихідні дані, задає склад сировини та вибирає тип розрахунку. Після цього запускається алгоритм чисельного розв'язання системи рівнянь кінетичної моделі. Усі необхідні параметри процесу автоматично зчитуються з бази даних, що значно спрощує роботу користувача та зменшує ймовірність помилок під час введення інформації.

Використання комп'ютерної моделюючої системи дозволяє підвищити точність прогнозування роботи установки каталітичної депарафінації, оптимізувати технологічні режими, знизити енергетичні витрати та забезпечити стабільну якість дизельного палива відповідно до сучасних вимог України та країн Європейського Союзу.

На рисунку 2.2 наведено схематичне зображення взаємодії між користувачем та розробником математичної моделі на етапах її створення, налаштування та промислової апробації.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		36

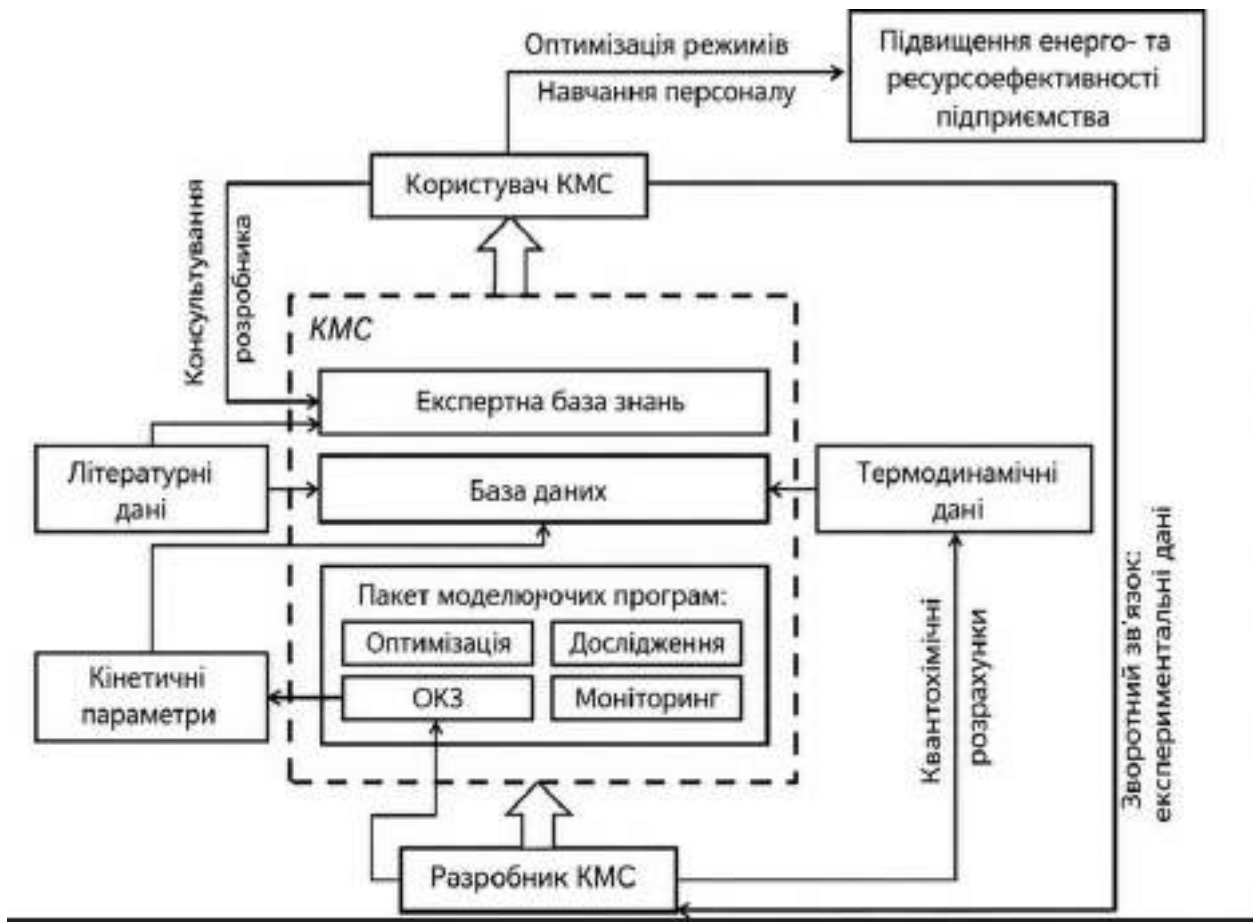


Рисунок 2.2 – Взаємодія розробника і користувача продукту

### 3. Розрахунковий розділ

#### 3.1 Вплив температури на процес каталітичної депарафінізації

Температура є одним із найважливіших технологічних параметрів процесу каталітичної депарафінізації дизельних палив, оскільки саме вона визначає швидкість перебігу хімічних реакцій, ступінь перетворення нормальних парафінових вуглеводнів та якість отриманого продукту. Зміна температурного режиму безпосередньо впливає на низькотемпературні властивості дизельного палива, вихід цільових фракцій, глибину гідрокрекінгу та стабільність роботи каталізатора.

У процесі каталітичної депарафінізації основними реакціями є ізомеризація нормальних парафінів та їх частковий гідрокрекінг. Підвищення температури сприяє збільшенню швидкості цих реакцій, що призводить до зменшення вмісту високомолекулярних n-парафінів у паливі. У результаті цього покращуються низькотемпературні характеристики дизельного палива — знижуються температура застигання, температура помутніння та гранична температура фільтрованості.

Разом із тим надмірне підвищення температури може викликати інтенсифікацію побічних реакцій гідрокрекінгу, що супроводжується збільшенням утворення легких бензинових та газоподібних продуктів. Це призводить до зменшення виходу дизельної фракції та підвищення енерговитрат процесу. Крім того, високі температури прискорюють дезактивацію каталізатора внаслідок закоксування його поверхні.

Для промислових установок каталітичної депарафінізації типовий температурний інтервал процесу становить приблизно 320–420 °С. Оптимальне значення температури визначається складом сировини, активністю каталізатора, тиском та вимогами до якості готового палива.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		38

Швидкість хімічних реакцій у процесі каталітичної депарафінізації описується рівнянням Арреніуса:

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \dots\dots\dots(3.1)$$

де:

- $k$  — константа швидкості реакції;
- $k_0$  — передекспоненціальний множник;
- $E_a$  — енергія активації, Дж/моль;
- $R$  — універсальна газова стала;
- $T$  — абсолютна температура, К.

Із рівняння видно, що зі зростанням температури значення константи швидкості реакції збільшується експоненціально, а отже, інтенсифікується процес перетворення парафінових вуглеводнів.

Приклад розрахунку впливу температури на швидкість реакції

Для оцінки впливу температури визначимо зміну константи швидкості реакції при підвищенні температури з 340 °С до 380 °С.

Нехай:

енергія активації процесу  $E_a=95 \cdot 10^3$  Дж/моль;

газова стала  $R=8,314$  Дж/(моль·К).

Температури в абсолютній шкалі:

$$T_1 = 340 + 273 = 613 \text{ K}$$

$$T_2 = 380 + 273 = 653 \text{ K}$$

Використаємо співвідношення констант швидкостей:

$$\frac{k_2}{k_1} = e^{\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \dots\dots\dots(3.2)$$

Підставляємо значення:

$$\frac{k_2}{k_1} = e^{\frac{95000}{8.314} \left( \frac{1}{613} - \frac{1}{653} \right)}$$

$$\frac{k_2}{k_1} = e^{11427 \cdot (0.001631 - 0.001531)}$$

$$\frac{k_2}{k_1} = e^{1.143} \approx 3.14$$

Отже, підвищення температури процесу з 340 °С до 380 °С збільшує швидкість реакції приблизно у 3,1 раза. Це підтверджує значний вплив температурного режиму на ефективність процесу каталітичної депарафінації.

На практиці підвищення температури дозволяє отримати дизельне паливо з нижчою температурою застигання. Наприклад, при роботі установки за температури близько 330–340 °С температура застигання палива може становити приблизно мінус 18...–25 °С, тоді як при 380–390 °С вона може знижуватися до мінус 45...–55 °С залежно від складу сировини та активності каталізатора.

Проте надмірне збільшення температури є економічно недоцільним через:

- зростання витрат водню;
- збільшення утворення легких фракцій;
- прискорення дезактивації каталізатора;
- підвищення енергоспоживання установки.

Таким чином, температура є визначальним фактором процесу каталітичної депарафінації. Вибір оптимального температурного режиму дозволяє забезпечити необхідні низькотемпературні властивості дизельного палива, високу селективність процесу та ефективну роботу промислової установки при мінімальних енергетичних витратах.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ доквм	Пілпис	Дата		40

### 3.2 Вплив складу сировина на процес каталітичної депарафінації

Склад сировини є одним із ключових факторів, що визначають ефективність процесу каталітичної депарафінації дизельних палив, стабільність роботи каталізатора та якість отримуваних продуктів. Вуглеводневий, фракційний та груповий склад нафтової сировини безпосередньо впливає на швидкість перебігу хімічних реакцій, глибину перетворення нормальних парафінів, вихід цільових фракцій та низькотемпературні властивості дизельного палива.

У сучасній нафтопереробній промисловості як сировину процесу каталітичної депарафінації найчастіше використовують атмосферний газойль, прямогонні дизельні фракції, а також суміші гідроочищених дистилатів із компонентами вторинних процесів переробки нафти. Властивості такої сировини можуть суттєво відрізнятися залежно від походження нафти, ступеня її переробки та співвідношення окремих компонентів у суміші.

Найбільший вплив на процес депарафінації має вміст нормальних парафінових вуглеводнів. Саме н-парафіни є основною причиною погіршення низькотемпературних властивостей дизельного палива, оскільки при охолодженні вони кристалізуються першими та утворюють просторову структуру, яка ускладнює прокачування палива через паливну систему. Зі збільшенням молекулярної маси нормальних парафінів температура їх кристалізації підвищується, що негативно впливає на температуру застигання та граничну температуру фільтрованості дизельного палива.

У процесі каталітичної депарафінації довголанцюгові нормальні парафіни піддаються ізомеризації та частковому гідрокрекінгу. У результаті цього утворюються ізопарафіни та легші вуглеводні, які мають

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		41

кращі низькотемпературні характеристики. Тому сировина з високим вмістом н-парафінів забезпечує значний потенціал покращення якості дизельного палива, однак водночас потребує більш жорстких технологічних режимів процесу.

Важливу роль також відіграє фракційний склад сировини. Легкі дизельні фракції характеризуються нижчим вмістом високомолекулярних парафінів, тому мають кращі низькотемпературні властивості ще до проведення депарафінізації. Водночас важкі газойлеві фракції містять значну кількість довголанцюгових парафінових вуглеводнів, що ускладнює процес їх переробки. Зі збільшенням температури кінця кипіння сировини підвищується вміст компонентів із високою температурою плавлення, що призводить до необхідності підвищення температури процесу та збільшення витрат водню.

Для оцінки впливу складу сировини на низькотемпературні властивості дизельного палива можна використати умовну залежність температури застигання від концентрації нормальних парафінів:

$$T_z = T_{base} + kC_{n-par} \quad (3.3)$$

де:

$T_z$  — температура застигання палива;

$T_{base}$  — базова температура застигання;

$k$  — коефіцієнт впливу парафінів;

$C_{n-par}$  — концентрація нормальних парафінів у сировині.

Із наведеної залежності видно, що збільшення вмісту н-парафінів у сировині призводить до підвищення температури застигання дизельного палива та погіршення його експлуатаційних характеристик за низьких температур.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ док.м	Пілпис	Дата		42

Окрім парафінових вуглеводнів, суттєвий вплив на процес мають ароматичні та нафтові сполуки. Ароматичні вуглеводні характеризуються нижчими температурами кристалізації та певною мірою покращують низькотемпературні властивості палив. Однак їх надлишковий вміст негативно впливає на цетанове число дизельного палива та підвищує токсичність продуктів згоряння. Крім того, поліциклічні ароматичні вуглеводні сприяють утворенню коксових відкладень на поверхні каталізатора, що призводить до його поступової дезактивації.

Нафтові вуглеводні займають проміжне положення між парафінами та ароматичними сполуками. Вони характеризуються відносно хорошими низькотемпературними властивостями та меншою схильністю до утворення коксу, тому їх присутність у сировині вважається сприятливою для процесу каталітичної депарафінації.

Суттєве значення має також вміст сірчистих, азотистих та кисневмісних сполук. Сірковмісні компоненти негативно впливають на активність каталізатора, викликаючи отруєння активних центрів. Особливо небезпечними є меркаптани та інші активні сірчисті сполуки, які прискорюють дезактивацію каталізатора та знижують селективність процесу. Саме тому перед депарафінацією сировина зазвичай проходить стадію гідроочищення.

Вміст азотистих сполук також є небажаним, оскільки вони здатні адсорбуватися на кислотних центрах каталізатора та зменшувати його активність. Крім того, наявність гетероатомних сполук сприяє інтенсивнішому утворенню смолистих речовин і коксу.

Для оцінки впливу складу сировини на швидкість дезактивації каталізатора можна використати спрощену залежність:

$$a = a_0 e^{-\alpha C_s t} \dots\dots\dots(3.4)$$

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		43

де:

$a$  — поточна активність каталізатора;

$a_0$  — початкова активність каталізатора;

$\alpha$  — коефіцієнт дезактивації;

$C_s$  — концентрація сірчистих сполук;

$t$  — час роботи каталізатора.

Із формули видно, що зі збільшенням концентрації сірчистих сполук активність каталізатора знижується швидше, що призводить до скорочення міжрегенераційного періоду роботи установки.

На практиці склад сировини також визначає необхідний технологічний режим процесу. Для сировини з високим вмістом парафінів застосовують підвищені температури та більші витрати водню. Якщо ж у сировині міститься значна кількість ароматичних вуглеводнів або важких фракцій, виникає потреба у збільшенні тиску процесу для забезпечення стабільної роботи каталізатора та запобігання коксоутворенню.

Особливу увагу у сучасних умовах приділяють використанню сировини з різних джерел походження, зокрема сумішей прямогонних дизельних фракцій із компонентами вторинних процесів переробки нафти. Такі суміші мають нестабільний склад, що ускладнює прогнозування результатів процесу та потребує застосування математичного моделювання для вибору оптимальних режимів роботи установки.

У нафтопереробній галузі України та країн Європейського Союзу питання впливу складу сировини на процес каталітичної депарафінізації є особливо актуальним через необхідність виробництва дизельних палив, які відповідають сучасним екологічним стандартам EN 590 та забезпечують надійну роботу техніки в умовах низьких температур.

Таким чином, склад сировини є одним із визначальних факторів ефективності процесу каталітичної депарафінізації. Від вмісту парафінових, ароматичних та гетероатомних сполук залежить глибина

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		44

перетворення вуглеводнів, стабільність роботи каталізатора, вихід дизельної фракції та низькотемпературні властивості готового продукту. Раціональний вибір складу сировини та оптимізація технологічних параметрів процесу дозволяють підвищити ефективність роботи установки, зменшити енергетичні витрати та забезпечити стабільну якість дизельного палива.

### **3.3 Вплив активності каталізатора на процес депарафінації**

Активність каталізатора є одним із найважливіших факторів, що визначають ефективність процесу каталітичної депарафінації дизельних палив. Саме від активності каталізатора залежить швидкість перебігу хімічних реакцій, ступінь перетворення нормальних парафінових вуглеводнів, селективність процесу, вихід цільових продуктів та стабільність роботи промислової установки. У сучасних умовах виробництва дизельних палив зимових та арктичних марок питання підтримання високої активності каталізатора є особливо важливим, оскільки дозволяє забезпечити необхідні низькотемпературні властивості палива при мінімальних енергетичних витратах.

У процесі каталітичної депарафінації застосовують біфункціональні каталізатори, які поєднують кислотні та гідруючі активні центри. Кислотні центри забезпечують реакції ізомеризації та крекінгу нормальних парафінів, тоді як металеві компоненти каталізатора відповідають за реакції гідрування і дегідрування вуглеводнів. Найбільш поширеними є каталізатори на основі цеолітів, модифікованих сполуками нікелю, молібдену, кобальту або платини.

Активність каталізатора характеризує його здатність прискорювати хімічні реакції та забезпечувати необхідний ступінь перетворення сировини за певний проміжок часу. Висока активність каталізатора

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		45

дозволяє проводити процес за нижчих температур і менших витрат водню, що позитивно впливає на економічність виробництва та збільшує вихід дизельної фракції.

Основними реакціями процесу каталітичної депарафінізації є ізомеризація нормальних парафінів та їх частковий гідрокрекінг. За високої активності каталізатора переважають реакції ізомеризації, у результаті яких утворюються ізопарафіни з покращеними низькотемпературними властивостями. Це дозволяє знизити температуру застигання та граничну температуру фільтрованості дизельного палива без значного зменшення виходу цільового продукту.

При недостатній активності каталізатора ступінь перетворення нормальних парафінів зменшується, що призводить до погіршення низькотемпературних властивостей дизельного палива. У такому випадку для досягнення необхідної якості продукту доводиться підвищувати температуру процесу, що супроводжується збільшенням енергетичних витрат та прискоренням дезактивації каталізатора.

Вплив активності каталізатора на швидкість реакції можна описати за допомогою кінетичного рівняння:

$$r = kaC \dots\dots\dots(3.5)$$

де:

$r$ — швидкість реакції;

$k$  — константа швидкості реакції;

$a$  — активність каталізатора;

$C$  — концентрація реагуючих компонентів.

Із наведеної залежності видно, що швидкість процесу прямо пропорційна активності каталізатора. При зниженні активності швидкість перетворення парафінових вуглеводнів зменшується, що негативно впливає на ефективність процесу.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		46

Активність каталізатора не є постійною величиною і поступово знижується в процесі експлуатації. Основною причиною дезактивації є утворення коксових відкладень на поверхні каталізатора. Кокс утворюється внаслідок полімеризації ненасичених і ароматичних вуглеводнів та блокує активні центри каталізатора, зменшуючи його реакційну здатність.

Зниження активності каталізатора можна описати експоненціальною залежністю:

$$a = a_0 e^{-kt} \dots\dots\dots(3.6)$$

де:

$a$  — поточна активність каталізатора;

$a_0$  — початкова активність;

$k$  — константа дезактивації;

$t$  — час роботи каталізатора.

Згідно з даною залежністю, активність каталізатора поступово зменшується з часом, а швидкість дезактивації залежить від умов процесу та складу сировини.

На інтенсивність дезактивації значно впливають сірчисті, азотисті та смолисті сполуки, присутні у сировині. Сірковмісні сполуки можуть отруювати металеві активні центри каталізатора, а азотисті компоненти — нейтралізувати кислотні центри. У результаті цього погіршується селективність процесу та знижується ступінь депарафінації.

Особливо негативний вплив мають поліциклічні ароматичні вуглеводні, які сприяють утворенню коксу. Для запобігання швидкій дезактивації каталізатора сировину перед процесом депарафінації піддають гідроочищенню, у результаті якого видаляються сірчисті та азотисті сполуки.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		47

Важливим фактором підтримання високої активності каталізатора є температурний режим процесу. Підвищення температури сприяє зростанню швидкості реакцій, однак водночас прискорює процес коксоутворення та термічної деструкції активної поверхні каталізатора. Тому для кожного типу каталізатора існує оптимальний температурний інтервал експлуатації.

Приклад впливу активності каталізатора на температуру застигання дизельного палива можна розглянути умовно. Якщо за початкової активності каталізатора температура застигання продукту становить мінус 50 °С, то при зниженні активності на 20 % температура застигання може зрости до мінус 38...–40 °С. Це пояснюється зменшенням глибини перетворення високомолекулярних парафінів.

Залежність температури застигання від активності каталізатора можна подати у вигляді:

$$T_z = T_{min} + b(1 - a) \dots\dots\dots(3.7)$$

де:

$T_z$  — температура застигання продукту;

$T_{min}$  — мінімальна температура застигання при максимальній активності;

$b$  — коефіцієнт впливу активності;

$a$  — відносна активність каталізатора.

Із наведеної залежності видно, що зі зменшенням активності каталізатора температура застигання дизельного палива підвищується.

У промислових умовах для підтримання активності каталізатора застосовують різні методи регенерації. Найпоширенішим способом є випалювання коксових відкладень у потоці повітря або кисневмісного газу при підвищених температурах. Після регенерації частина активності

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		48

катализатора відновлюється, однак повне повернення початкових характеристик зазвичай неможливе через структурні зміни катализатора.

Велике значення має також структура катализатора. Цеоліти з вузькими порами забезпечують високу селективність ізомеризації, тоді як катализатори з більшим діаметром пор активніше сприяють реакціям гідрокрекінгу. Вибір типу катализатора залежить від складу сировини та вимог до якості готового палива.

У сучасних нафтопереробних підприємствах України та країн Європейського Союзу для контролю активності катализатора широко використовуються комп'ютерні системи моніторингу та математичні моделі процесу. Вони дозволяють прогнозувати ступінь дезактивації катализатора, оптимізувати режими роботи установки та своєчасно планувати проведення регенерації.

Підтримання високої активності катализатора має важливе економічне значення. Високоактивний катализатор дозволяє зменшити температуру процесу, скоротити витрати водню та збільшити вихід дизельного палива. Крім того, це забезпечує стабільну якість продукту відповідно до сучасних екологічних вимог і стандартів EN 590.

Таким чином, активність катализатора є одним із визначальних параметрів процесу каталітичної депарафінації. Від її величини залежать швидкість реакцій, глибина перетворення парафінових вуглеводнів, вихід дизельної фракції та низькотемпературні властивості готового продукту.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		49

#### 4. Результати проведеної роботи

У ході виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження процесу каталітичної депарафінізації дизельних палив, проаналізовано основні фактори, що впливають на ефективність процесу, а також розроблено математичну модель і комп'ютерну моделюючу систему для прогнозування технологічних параметрів та оптимізації режимів роботи установки.

На першому етапі роботи було виконано аналіз науково-технічної літератури, присвяченої сучасним методам отримання дизельних палив із покращеними низькотемпературними властивостями. У результаті аналізу встановлено, що каталітична депарафінізація є одним із найбільш ефективних способів виробництва зимових та арктичних марок дизельного палива. На відміну від фізичних методів видалення парафінів, цей процес дозволяє не лише знижувати температуру застигання, але й забезпечувати збереження високого виходу дизельної фракції та покращення експлуатаційних характеристик палива.

У роботі було детально досліджено вплив температури процесу на перебіг реакцій каталітичної депарафінізації. Встановлено, що підвищення температури сприяє інтенсифікації реакцій ізомеризації та гідрокрекінгу нормальних парафінових вуглеводнів, унаслідок чого покращуються низькотемпературні властивості дизельного палива. Проведені розрахунки показали, що зі збільшенням температури процесу від 340 °С до 380 °С швидкість реакцій може зростати більш ніж у три рази, що підтверджує значний вплив температурного режиму на ефективність процесу.

Разом із тим було встановлено, що надмірне підвищення температури є небажаним, оскільки призводить до інтенсифікації побічних реакцій гідрокрекінгу, збільшення утворення легких газоподібних продуктів та зменшення виходу цільової дизельної фракції. Крім того, високі

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		50

температури прискорюють процес дезактивації каталізатора внаслідок утворення коксових відкладень на його поверхні. У результаті проведеного аналізу визначено, що оптимальний температурний режим процесу забезпечує баланс між глибиною депарафінізації та економічною ефективністю виробництва.

Окрему увагу в роботі приділено впливу складу сировини на процес каталітичної депарафінізації. Установлено, що найбільший вплив на низькотемпературні властивості дизельного палива має вміст нормальних парафінових вуглеводнів. Саме ці компоненти при охолодженні кристалізуються першими та викликають погіршення прокачуваності палива. Визначено, що сировина з високим вмістом н-парафінів потребує більш жорстких режимів переробки та підвищених температур процесу.

Також у роботі досліджено вплив ароматичних, нафтових і гетероатомних сполук на перебіг процесу. Було встановлено, що надлишковий вміст ароматичних вуглеводнів сприяє утворенню коксових відкладень та прискорює дезактивацію каталізатора. Сірчисті й азотисті сполуки негативно впливають на активні центри каталізатора, знижуючи його ефективність. У зв'язку з цим підтверджено необхідність попереднього гідроочищення сировини перед процесом каталітичної депарафінізації.

У процесі виконання роботи було проаналізовано вплив активності каталізатора на ефективність процесу. Встановлено, що активність каталізатора безпосередньо визначає швидкість перетворення нормальних парафінів та ступінь покращення низькотемпературних властивостей дизельного палива. Високоактивний каталізатор забезпечує переважання реакцій ізомеризації над реакціями гідрокрекінгу, що дозволяє отримувати дизельне паливо з низькою температурою застигання при мінімальних втратах цільової фракції.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		51

У роботі встановлено, що в процесі експлуатації активність каталізатора поступово знижується через утворення коксових відкладень та вплив гетероатомних сполук. Проведений аналіз показав, що зменшення активності каталізатора призводить до погіршення низькотемпературних властивостей дизельного палива та необхідності підвищення температури процесу для підтримання заданої якості продукту. Це, у свою чергу, спричиняє збільшення енергетичних витрат та прискорення зношування каталізатора.

Одним із головних результатів роботи стало створення математичної моделі процесу каталітичної депарафінізації. Розроблена модель базується на формалізованій схемі хімічних перетворень та враховує перебіг основних реакцій ізомеризації, гідрокрекінгу та побічних процесів. Для опису кінетики процесу було використано систему диференціальних рівнянь, що дозволило врахувати зміну концентрацій компонентів у часі та оцінити вплив технологічних параметрів на якість продуктів.

Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати склад та властивості дизельного палива залежно від температури процесу, складу сировини, активності каталізатора та інших параметрів. Важливою перевагою моделі є можливість використання її для оптимізації режимів роботи промислової установки та прогнозування зміни характеристик продуктів при зміні технологічних умов.

На основі математичної моделі була створена комп'ютерна моделююча система процесу каталітичної депарафінізації. Розроблена система включає базу даних фізико-хімічних властивостей компонентів, базу знань та програмний модуль чисельного розв'язання системи рівнянь моделі. Використання комп'ютерної системи дозволяє автоматизувати процес розрахунків, підвищити точність прогнозування та забезпечити підтримку прийняття технологічних рішень.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		52

У результаті проведених досліджень було визначено оптимальні умови ведення процесу каталітичної депарафінації, які забезпечують отримання дизельного палива з покращеними низькотемпературними властивостями та високим виходом цільової продукції. Отримані результати підтверджують ефективність використання математичного моделювання для аналізу та оптимізації процесів нафтопереробки.

Практичне значення виконаної роботи полягає у можливості використання розробленої математичної моделі та комп'ютерної моделюючої системи для оптимізації роботи промислових установок каталітичної депарафінації на нафтопереробних підприємствах України та країн Європейського Союзу. Використання запропонованих рішень дозволить знизити енергетичні витрати, підвищити ефективність використання сировини, збільшити ресурс каталізатора та забезпечити стабільну якість дизельного палива відповідно до сучасних екологічних стандартів.

Таким чином, у результаті виконання дипломної роботи було досягнуто поставленої мети — проведено дослідження процесу каталітичної депарафінації дизельних палив, встановлено основні закономірності впливу технологічних параметрів, складу сировини та активності каталізатора на ефективність процесу, а також розроблено математичну модель і комп'ютерну систему для прогнозування та оптимізації роботи промислової установки.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		53

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження процесу каталітичної депарафінізації дизельних палив та проаналізовано основні фактори, що визначають ефективність цього процесу. На основі аналізу науково-технічної літератури, математичного моделювання та дослідження технологічних параметрів підтверджено актуальність застосування каталітичної депарафінізації для виробництва дизельних палив із покращеними низькотемпературними властивостями.

У ході роботи встановлено, що сучасні вимоги до дизельних палив пов'язані не лише із забезпеченням ефективної роботи дизельних двигунів, але й із необхідністю дотримання екологічних стандартів та забезпечення стабільної експлуатації техніки в умовах низьких температур. Особливого значення набуває виробництво зимових та арктичних марок дизельного палива, здатних забезпечувати надійну роботу транспортних засобів і промислового обладнання в умовах холодного клімату.

Проведений аналіз показав, що основною причиною погіршення низькотемпературних властивостей дизельного палива є наявність у його складі нормальних парафінових вуглеводнів, які при зниженні температури кристалізуються та утворюють структури, що ускладнюють прокачування палива через паливну систему. У зв'язку з цим каталітична депарафінізація є одним із найбільш перспективних способів покращення експлуатаційних характеристик дизельних палив.

У роботі було досліджено вплив температури процесу на ефективність каталітичної депарафінізації. Встановлено, що підвищення температури сприяє збільшенню швидкості реакцій ізомеризації та гідрокрекінгу парафінових вуглеводнів, у результаті чого покращуються

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ доквм	Пілпис	Дата		54

низькотемпературні властивості дизельного палива. Разом із тим надмірне підвищення температури призводить до розвитку побічних реакцій, збільшення утворення газоподібних продуктів та прискорення дезактивації каталізатора. У результаті дослідження визначено доцільність підтримання оптимального температурного режиму, який забезпечує необхідну глибину депарафінації при мінімальних енергетичних витратах.

Також у роботі проаналізовано вплив складу сировини на перебіг процесу. Встановлено, що вміст нормальних парафінів, ароматичних та гетероатомних сполук суттєво впливає на ефективність процесу депарафінації та стабільність роботи каталізатора. Підтверджено, що попереднє гідроочищення сировини дозволяє зменшити негативний вплив сірчистих і азотистих сполук, підвищити ресурс каталізатора та забезпечити стабільну якість отриманого дизельного палива.

У процесі виконання роботи досліджено вплив активності каталізатора на технологічні показники процесу. Встановлено, що висока активність каталізатора забезпечує ефективне перетворення нормальних парафінових вуглеводнів у ізопарафіни, що дозволяє знижувати температуру застигання та граничну температуру фільтрованості дизельного палива без значних втрат виходу цільового продукту. Водночас зниження активності каталізатора внаслідок утворення коксових відкладень призводить до погіршення низькотемпературних властивостей палива та необхідності коригування режиму роботи установки.

Одним із основних результатів дипломної роботи стало створення математичної моделі процесу каталітичної депарафінації. Розроблена модель враховує основні фізико-хімічні закономірності процесу та дозволяє описати перебіг реакцій ізомеризації, гідрокрекінгу та побічних перетворень вуглеводнів. Використання системи диференціальних рівнянь дозволило врахувати зміну концентрацій компонентів у реакторі та

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		55

оцінити вплив технологічних параметрів на склад і властивості кінцевого продукту.

На основі математичної моделі було розроблено комп'ютерну моделюючу систему процесу каталітичної депарафінізації. Створена система містить базу даних фізико-хімічних характеристик компонентів, кінетичних параметрів реакцій та програмний модуль для чисельного розрахунку процесу. Розроблена система забезпечує можливість прогнозування властивостей продуктів, аналізу впливу технологічних параметрів та оптимізації режимів роботи промислової установки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої математичної моделі та комп'ютерної системи для підвищення ефективності роботи установок каталітичної депарафінізації на нафтопереробних підприємствах. Використання результатів роботи дозволяє оптимізувати технологічні режими, зменшити енергетичні витрати, підвищити вихід дизельної фракції та забезпечити стабільне виробництво дизельного палива, що відповідає сучасним європейським екологічним стандартам.

У результаті виконання дипломної роботи поставлена мета була досягнута повністю. Проведено дослідження процесу каталітичної депарафінізації дизельних палив, визначено основні закономірності впливу температури, складу сировини та активності каталізатора на перебіг процесу, а також розроблено математичну модель і комп'ютерну систему, які можуть бути використані для прогнозування та оптимізації роботи промислових установок.

Отримані результати можуть бути використані у подальших дослідженнях, спрямованих на вдосконалення каталітичних систем, підвищення енергоефективності процесів нафтопереробки та створення нових технологій виробництва дизельних палив із покращеними низькотемпературними та екологічними характеристиками.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		56

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	Но докум	Пілпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойченко С. В., Черняк Л. М. Моторні палива: властивості та якість. – Київ : НАУ, 2017. – 324 с.
2. Гринишин О. Б., Чухрай М. Р. Технологія переробки нафти і газу. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 256 с.
3. Гунько В. М., Денисюк В. П. Каталітичні процеси нафтопереробки. – Київ : Техніка, 2016. – 412 с.
4. Кухар В. П., Осередчук О. С. Хімічна технологія палива. – Львів : Львівська політехніка, 2019. – 368 с.
5. Лейда К. М., Положин І. П. Сучасні технології виробництва дизельних палив. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. – 295 с.
6. Speight J. G. The Chemistry and Technology of Petroleum. – 5th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 992 p.
7. Gary J. H., Handwerk G. E., Kaiser M. J. Petroleum Refining: Technology and Economics. – 5th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2007. – 488 p.
8. Ancheyta J., Speight J. G. Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua. – Boca Raton : CRC Press, 2007. – 338 p.
9. Meyers R. A. Handbook of Petroleum Refining Processes. – 4th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2016. – 1200 p.
10. Stanislaus A., Marafi A., Rana M. S. Recent advances in the science and technology of ultra low sulfur diesel production // Catalysis Today. – 2010. – Vol. 153. – P. 1–68.
11. Shah A., Fishwick R., Wood J. A review of catalytic dewaxing processes for middle distillates // Fuel Processing Technology. – 2018. – Vol. 171. – P. 1–15.
12. European Committee for Standardization. EN 590: Automotive Fuels – Diesel – Requirements and Test Methods. – Brussels : CEN, 2023. – 78 p.

					КвРАТ. 23451.02.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		58

13. ASTM International. ASTM D975 – Standard Specification for Diesel Fuel Oils. – West Conshohocken : ASTM International, 2022. – 12 p.

14. Ertl G., Knözinger H., Schüth F., Weitkamp J. Handbook of Heterogeneous Catalysis. – 2nd ed. – Weinheim : Wiley-VCH, 2008. – 4272 p.

15. European Environment Agency. Air Quality in Europe – 2023 Report. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. – 180 p.

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		59

**ДОДАТКИ**

					<i>КвРАТ. 23451.02.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		60