

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Навчально-науковий інститут
«Український державний хіміко-технологічний університет»
(назва навчально-наукового інституту)

Харчових та хімічних технологій

(повна назва факультету)

Технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістр

(освітній рівень)

на тему: Виробництво технічного вуглецю на основі модифікованої сировинної суміші

Виконав: студент 6 курсу, групи ХТ-97
спеціальності 161 Хімічні технології та
інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Холкін В.Я.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Тертишина О.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Головенко В.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Дніпро – 2026 року

Відомість дипломного проекту						
№ П/ П	ФОРМАТ	ПОЗНАЧЕННЯ	НАЙМЕНУВАННЯ	КІЛ. АРКУШІВ	№ ЕКЗ-РУ	ПРИ- МІТКА
			<u>ДОКУМЕНТАЦІЯ</u>			
			<u>ЗАГАЛЬНА</u>			
			ЗАНОВО РОЗРОБЛЕНА			
1	A4	6-ХТ-97 026 161 001 КР ПЗ	ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
2	A4	6-ХТ-97 026 161 001 КР ПР	ПРЕЗЕНТАЦІЯ	12		
			<u>ДОКУМЕНТАЦІЯ ПО</u>			
			<u>ЗБІРНИХ ОДИНИЦЯХ</u>			
			ЗАНОВО РОЗРОБЛЕНА			

					6-ХТ-97 026 161 001 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Холкін В.Я.			Виробництво технічного вуглецю на основі модифікованої сировинної суміші	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Тертишина О.В.					1	1
Реценз.						УДУНТ ННІ УДХТУ каф. ТПП та ПМ		
Н. Контр.								
Затверд.		Сухий К.М.						

Український державний університет науки і технологій
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут
«Український державний хіміко-технологічний університет»
(назва навчально-наукового інституту)

Факультет, відділення харчових та хімічних технологій
Кафедра технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів
Освітній
рівень магістр
Спеціальність G1 «Хімічні технології та інженерія»
(код і назва)
Спеціалізація _____
(шифр і назва)
Освітня програма G1 «Хімічні технології та інженерія»
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТПП та

ПМ

Костянтин СУХИЙ

" ____ " _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

- Холкіну Владиславу Яновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема проєкту (роботи) Виробництво технічного вуглецю на основі
модифікованої сировинної суміші
- керівник проєкту (роботи) Тертишина Олена Вікторівна, д-р. техн. наук,
проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом вищого навчального закладу від 16.10.2026 р. №1465-ст
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 червня 2026 року
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) літературні
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, Літературний огляд, Методи дослідження та матеріали. Результати та їх обговорення, Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях, Організаційно-економічна частина, Висновки, Список використаної літератури, Додатки
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічна частина	<i>Тертишина О.В., професор</i>		
Спец. частина	<i>Тертишина О.В., професор</i>		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	<i>Герасименко В.О., доцент</i>		
Організаційно-економічна частина	<i>Гончар Л.А., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
	<i>Вступ; аналітичний огляд літератури;</i>	<i>10.10 – 15.10. 2025</i>	
	<i>Експериментальна частина</i>	<i>16.11.2025 – 20.02.2026</i>	
	<i>Створення геометрії та сітки</i>	<i>12.03.2026</i>	
	<i>Налаштування фізики STAR-CCM+</i>	<i>25.04.2026</i>	
	<i>Моделювання</i>	<i>30.04.2026</i>	
	<i>Аналіз результатів</i>	<i>5.05.–25.05.2026</i>	
	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях;</i>	<i>07.05 – 17.05.2026</i>	
	<i>Організаційно-економічна частина</i>	<i>10.03–20.03.2026</i>	
	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>25.04–5.05</i>	
	<i>Підготовка презентації</i>	<i>10.05– 1.06.2026</i>	

Студент _____ Владислав ХОЛКІН
(підпис) (ініціали, прізвище)

Керівник проєкту (роботи) _____ Олена ТЕРТИШНА
(підпис) (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 12 табл., 10 рис., 30 джерел

ТЕХНІЧНИЙ ВУГЛЕЦЬ, ШИННА ПІРОЛІЗНА ОЛИВА, ПІРОЛІЗНИЙ ГАЗ, ВІДПРАЦЬОВАНІ ШИНИ, CFD-МОДЕЛЮВАННЯ, Simcenter STAR-CCM+, ГОРІННЯ, РЕАКТОР, АЛЬТЕРНАТИВНА СИРОВИНА, ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА

Магістерська робота присвячена дослідженню можливості використання продуктів піролізу відпрацьованих автомобільних шин у виробництві технічного вуглецю та оцінці впливу альтернативної сировини на параметри технологічного процесу. Особливу увагу приділено застосуванню шинної піролізної оливи як компонента вуглеводневої сировини та використанню піролізного газу як альтернативного палива в реакторі виробництва технічного вуглецю.

Метою роботи – дослідження можливості часткової заміни традиційної вуглеводневої сировини та палива продуктами піролізу відпрацьованих шин, а також оцінка їх впливу на технологічні параметри процесу одержання технічного вуглецю та характеристики готового продукту.

Об'єкт дослідження – процес виробництва технічного вуглецю із використанням шинної піролізної оливи та піролізного газу відпрацьованих автомобільних шин.

Предмет дослідження – фізико-хімічні властивості шинної піролізної оливи, характеристики технічного вуглецю, процеси горіння паливних сумішей, а також теплогідродинамічні закономірності функціонування реактора виробництва технічного вуглецю.

У роботі виконано аналіз сучасного стану виробництва технічного вуглецю та напрямів використання продуктів піролізу відпрацьованих шин. Проведено промислові випробування сировинних композицій із введенням

шинної піролізної оливи в кількості 5 та 10 мас. %. Виконано порівняльне CFD-моделювання процесів горіння природного та піролізного газу в середовищі Simcenter STAR-CCM+. Для моделювання використано осесиметричну 2D-модель реактора з розрахунковою сіткою, що містила 20716 комірок. Розрахунки здійснювалися в стаціонарному режимі з використанням моделі турбулентності Realizable k-ε та методу дискретних ординат для врахування променистого теплообміну.

Отримані результати підтвердили перспективність використання продуктів піролізу шин як альтернативних компонентів сировини та палива для виробництва технічного вуглецю, що відповідає принципам ресурсозбереження та циркулярної економіки.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Технічний вуглець: сучасний стан виробництва та перспективи використання альтернативної сировини.....	10
1.2 Механізм піролізу відпрацьованих шин	16
1.3 Математичне та комп'ютерне моделювання процесів горіння у реакторах технічного вуглецю.....	23
2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕРІАЛИ	29
3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	34
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	51
4.1 Оцінка умов, в яких виконується дослідницька робота.....	51
4.2 Оцінка стану об'єкту в надзвичайних ситуаціях.....	52
4.3 Заходи зі створення безпечних і здорових умов праці	54
4.4 Протипожежні заходи.....	58
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	60
5.1 Актуальність проведення дослідження	60
5.2 Організація дослідження та її оптимізація на засадах мережевої моделі	60
5.3 Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження	64
5.4 Економічне обґрунтування практичного використання наукового дослідження	68
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	72
ДОДАТКИ.....	73

ВСТУП

Технічний вуглець є одним із найважливіших продуктів сучасної нафтохімічної промисловості, виробництво якого традиційно ґрунтується на використанні важких нафтових дистилятів, ароматичних екстрактів та побічних продуктів коксохімічного виробництва. Основу сировинної бази становлять високомолекулярні вуглеводневі сполуки з підвищеним вмістом ароматичних структур, які під дією високих температур здатні утворювати дисперсний вуглецевий матеріал із необхідними морфологічними та структурними характеристиками.

В умовах сучасних економічних і геополітичних викликів, що супроводжуються порушенням постачання сировинних ресурсів та обмеженням доступу до окремих продуктів нафтопереробки, особливого значення набуває пошук нових джерел вуглецевмісної сировини для виробництва технічного вуглецю. Для України це питання є особливо актуальним через необхідність підвищення ресурсної незалежності промисловості та зниження ризиків, пов'язаних із нестабільністю традиційних ланцюгів постачання.

Одним із найбільш перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є залучення до виробничого циклу продуктів термохімічної переробки полімерних відходів. Значний науковий і практичний інтерес становлять відпрацьовані автомобільні шини, обсяги накопичення яких щороку зростають. Через складну багатокомпонентну будову та високу стійкість до природного розкладання такі відходи створюють суттєве екологічне навантаження, тому розроблення ефективних технологій їх утилізації є одним із пріоритетних завдань циркулярної економіки.

Серед існуючих методів переробки шин особливу увагу привертає піроліз, який забезпечує одержання цінних вторинних ресурсів у вигляді газової, рідкої та твердої фракцій. Одним із найбільш перспективних

продуктів цього процесу є шинна піролізна олива, яка характеризується високим вмістом ароматичних вуглеводнів, поліциклічних сполук та ненасичених компонентів. Саме такий склад наближає її за властивостями до традиційної сировини, що використовується у виробництві технічного вуглецю.

Наявність значної кількості ароматичних і конденсованих структур у складі шинної піролізної оливи створює передумови для її використання як альтернативного або додаткового компонента вуглецевмісної сировини. При цьому склад і властивості оливи можуть суттєво впливати на механізми утворення частинок технічного вуглецю, визначаючи їхній розмір, ступінь агрегації, структурність та розвиток питомої поверхні. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення комплексних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей впливу шинної піролізної оливи на процеси формування технічного вуглецю та обґрунтування оптимального складу сировинних композицій.

Використання продуктів піролізу відпрацьованих шин у технології виробництва технічного вуглецю не лише розширює сировинну базу галузі, а й сприяє підвищенню ефективності використання відходів, зменшенню антропогенного навантаження на довкілля та скороченню споживання невідновлюваних викопних ресурсів. Крім екологічних переваг, впровадження такого підходу потенційно забезпечує зниження виробничих витрат і підвищення економічної стійкості підприємств за рахунок залучення доступної вторинної сировини до технологічного циклу.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Технічний вуглець: сучасний стан виробництва та перспективи використання альтернативної сировини

Технічний вуглець належить до найважливіших продуктів сучасної нафтохімічної промисловості та являє собою високодисперсний матеріал, що складається переважно з елементарного вуглецю. Його отримують шляхом неповного окиснення або термічного розкладання газоподібної чи рідкої вуглеводневої сировини за контрольованих технологічних умов [1]. Властивості технічного вуглецю визначаються як складом вихідної сировини, так і параметрами процесу його утворення, що обумовлює широкий спектр марок і напрямів застосування продукції.

Світове виробництво технічного вуглецю має стратегічне значення для багатьох галузей промисловості. За даними International Carbon Black Association [2], обсяги його виробництва перевищують 11 млн т на рік, що дозволяє віднести технічний вуглець до числа найбільш масових промислових хімічних продуктів. Основним споживачем технічного вуглецю є гумова промисловість [3], де близько 90–95 % продукції використовується як активний наповнювач та підсилювач еластомерних композицій, насамперед у виробництві автомобільних шин. Решта продукції застосовується у виробництві полімерів, фарб, покриттів, друкарських фарб, електропровідних матеріалів, джерел струму та функціональних наноматеріалів [4].

Залежно від технології синтезу розрізняють пічний, термічний, каналний, ламповий та ацетиленовий технічний вуглець. Найбільшого поширення у світовій практиці набув пічний спосіб виробництва, на частку якого припадає понад 90 % загального обсягу продукції. Для його реалізації використовують переважно ароматизовані важкі нафтові фракції, продукти

крекінгу, кам'яновугільні оливи та інші вуглеводневі матеріали нафтового походження [5].

Суттєвою проблемою сучасного виробництва технічного вуглецю залишається висока залежність від викопної сировини. Відомо, що витрати на сировинне забезпечення можуть становити понад половину загальної собівартості продукції [6]. Крім економічних аспектів, дедалі більшого значення набувають екологічні виклики, пов'язані зі скороченням запасів викопних ресурсів, збільшенням викидів парникових газів та необхідністю переходу до принципів сталого розвитку. У зв'язку з цим світова наукова спільнота активно досліджує можливості часткової або повної заміни традиційної нафтової сировини альтернативними джерелами вуглецю.

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання вторинних ресурсів та продуктів переробки відходів. Особливу увагу привертають відпрацьовані автомобільні шини, щорічні обсяги накопичення яких постійно зростають. Технологія піролізу шин дозволяє отримувати рідкі, тверді та газоподібні продукти, які можуть бути повторно залучені до промислового використання. Серед них значний інтерес становить шинна піролізна олива, яка характеризується високим вмістом ароматичних і поліциклічних вуглеводнів та потенційно може використовуватися як компонент сировинних сумішей для виробництва технічного вуглецю.

Використання альтернативної сировини на основі відходів забезпечує одночасне вирішення кількох актуальних завдань: зменшення залежності від традиційних нафтових ресурсів, скорочення обсягів накопичення відходів, зниження екологічного навантаження на довкілля та впровадження принципів циркулярної економіки. При цьому фізико-хімічні характеристики отриманого технічного вуглецю значною мірою залежать від складу вихідної сировини та умов її термічної трансформації, що обумовлює необхідність проведення комплексних досліджень впливу нових компонентів на якість кінцевого продукту.

Останні наукові дослідження свідчать про зростання інтересу до виробництва технічного вуглецю із застосуванням відновлюваних ресурсів та продуктів переробки відходів як одного з перспективних шляхів декарбонізації нафтохімічної галузі. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку ресурсоефективних технологій і може стати важливим інструментом забезпечення сталого розвитку промисловості в умовах обмеженості традиційної сировинної бази [7].

Виробництво технічного вуглецю є однією з найбільш матеріаломістких та енергоємних галузей нафтохімічної промисловості, яка відіграє стратегічну роль у забезпеченні шинної та гумотехнічної промисловості високоякісними наповнювачами [8].



Рисунок 1.1 – Умовна схема переробки відпрацьованих шин для виробництва технічного вуглецю [2]

Зростання інтересу до технологій термохімічної утилізації відпрацьованих шин сприяло формуванню значної наукової бази, що охоплює як фундаментальні, так і прикладні аспекти піролізного процесу. Сучасні оглядові дослідження висвітлюють питання конструкції та експлуатації реакторних систем [9, 10], математичного моделювання кінетики й механізмів

піролізу [11], удосконалення характеристик відновленого технічного вуглецю [12], а також впливу каталізаторів на склад і вихід цільових продуктів [13]. Одним із ключових чинників успішного впровадження піролізних технологій у промислових масштабах є досягнення оптимального співвідношення між якістю отриманих продуктів і енергоефективністю процесу. Регулювання температури, тривалості перебування сировини в реакційній зоні та каталітичних умов дозволяє цілеспрямовано керувати виходом рідких, газоподібних і твердих продуктів. Після відповідної обробки та модифікації ці продукти можуть розглядатися як цінні вторинні ресурси для різних секторів промисловості, що відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку.

Утилізація зношених шин методом піролізу є одним із найбільш перспективних напрямів реалізації принципів циркулярної економіки та ресурсоефективного виробництва. Процес піролізу полягає у термічному розкладанні гумовмісної сировини за відсутності кисню при температурах зазвичай 400–700 °С, що забезпечує перетворення складних полімерних структур гуми на газоподібні, рідкі та тверді продукти. Сучасні дослідження свідчать, що піроліз відпрацьованих шин дозволяє не лише вирішувати екологічні проблеми накопичення відходів, але й отримувати цінні вторинні ресурси з високим потенціалом подальшого використання.

У результаті піролізної переробки шин утворюються три основні товарні продукти: піролізна олива, відновлений технічний та сталевий корд (1.2). Співвідношення між цими продуктами залежить від складу сировини, типу реактора та технологічних параметрів процесу, насамперед температури, швидкості нагрівання та часу перебування матеріалу в реакційній зоні [14].

Піролізна олива є складною сумішшю ароматичних, аліфатичних та циклічних вуглеводнів і розглядається як перспективний енергетичний та хімічний ресурс. Після відповідного очищення та фракціонування воно може використовуватися як альтернативне паливо для металургійних підприємств, котельних установок, керамічного виробництва, електрогенеруючих

установок та промислових печей. Крім того, піролізне масло може виступати сировиною для подальшої хімічної переробки з отриманням окремих цінних хімічних компонентів.

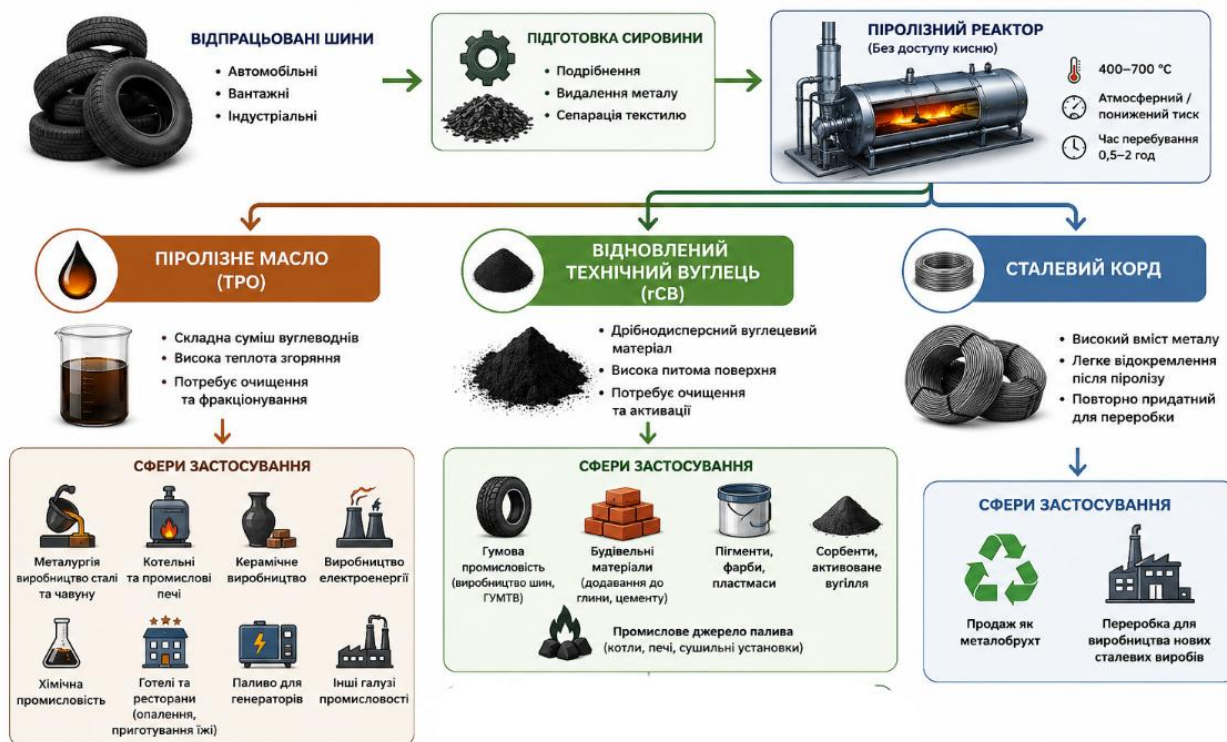


Рисунок 1.2 – Схема потоків продуктів піролізу відпрацьованих шин та кінцевих сфер їх застосування

Другим важливим продуктом є відновлений технічний вуглець, який становить значну частину твердого залишку після піролізу. Після очищення від мінеральних домішок, залишкових летких речовин та активації його властивості можуть наближатися до характеристик комерційних марок технічного вуглецю. Відновлений технічний вуглець використовується як наповнювач у гумовій промисловості, при виробництві шин, гумотехнічних виробів, пластмас, пігментів, будівельних матеріалів, а також як вихідна сировина для отримання активованих вуглецевих матеріалів та сорбентів. Сучасні дослідження показують суттєве зростання інтересу до твердого залишку піролізу відпрацьованих шин як екологічно доцільної альтернативи традиційному технічному вуглецю нафтохімічного походження.

Третім продуктом є сталевий корд, який після механічного відокремлення характеризується високим вмістом металу та може безпосередньо реалізовуватися як металобрухт або використовуватися як вторинна сировина в металургійному виробництві. Повернення сталі до виробничого циклу забезпечує додатковий економічний ефект та сприяє зменшенню споживання первинної залізорудної сировини.

Таким чином, сучасні піролізні технології дозволяють перетворити відпрацьовані шини з екологічно небезпечного відходу на джерело енергетичних та матеріальних ресурсів. Найбільш перспективним напрямом розвитку галузі вважається інтеграція піролізу з подальшим очищенням піролізного масла, модифікацією відновленого технічного вуглецю та повторним використанням металевої складової, що забезпечує максимальне наближення до концепції безвідходного виробництва та циркулярної економіки.

Традиційна технологія отримання дисперсного вуглецю промисловим печним методом базується на використанні високоароматизованих рідких вуглеводнів нафтового та коксохімічного походження. До таких сировинних ресурсів належать важкі газойлі каталітичного крекінгу, дистиляти термічного крекінгу, антраценові оливи кам'яновугільні смоли. Головною вимогою до такої сировини є високий індекс кореляції, низький вміст сірки та асфальтено-смолистих речовин, що забезпечує максимальний вихід готового продукту із заданими морфологічними характеристиками (дисперсністю та структурністю).

Саме відпрацьовані автомобільні шини являють собою складні багатокомпонентні композиційні матеріали, основними складовими яких є еластомерна матриця, технічний вуглець та широкий спектр функціональних добавок. До складу шинних гумових сумішей входять природний каучук, синтетичні каучуки, зокрема стирол-бутадієновий (SBR) і бутадієновий (BR), а також пластифікатори, антиоксиданти, вулканізаційні агенти, оксид цинку та інші органічні й мінеральні компоненти. Типовий склад протекторної гуми

сучасних шин характеризується вмістом природного каучуку на рівні 20–25 %, стирол-бутадієнового каучуку – 30–50 %, бутадієнового каучуку – до 30 %, технічного вуглецю – близько 30 %, а сірки – 1,0–2,5 % [15]. Частка окремих компонентів може змінюватися залежно від функціонального призначення шини та вимог до її експлуатаційних характеристик [16].

Формування експлуатаційних властивостей шин забезпечується складною просторовою структурою вулканізованої гуми. У процесі виробництва природні та синтетичні каучуки змішуються у визначених співвідношеннях і піддаються вулканізації, внаслідок якої між макромолекулами утворюються поперечні сірковмісні зв'язки. Результатом цього є формування тривимірної зшитої полімерної сітки з високою механічною міцністю та стабільністю. Саме така структура забезпечує шинам необхідні властивості, зокрема здатність сприймати механічні навантаження, поглинати динамічні удари, протидіяти стиранню та зберігати працездатність у широкому діапазоні експлуатаційних умов.

1.2 Механізм піролізу відпрацьованих шин

Відпрацьовані шини є складною композиційною системою, основу якої становлять еластомерні матеріали, технічний вуглець та різноманітні допоміжні компоненти. У середньому близько 60 % маси шин припадає на природний і синтетичний каучуки, приблизно 30 % становить технічний вуглець, тоді як решта 10 % представлена органічними та мінеральними добавками. У процесі піролізної переробки відбувається термічна деструкція полімерної складової, що супроводжується утворенням летких продуктів і твердого вуглецевого залишку. Як правило, близько 60 % вихідної маси переходить у газоподібні та конденсовані рідкі продукти, тоді як близько 40 % формує тверду фазу, представлену переважно технічним вуглецем і мінеральними компонентами [17].

Оскільки основними органічними складовими шин є природний та синтетичні каучуки, механізм піролізу значною мірою визначається

особливостями їх термічного розкладання. Для природного каучуку початок інтенсивної деструкції спостерігається при температурах понад 300 °С. На початкових стадіях процесу переважає утворення олігомерних продуктів, зокрема димерів і тримерів ізопренового походження. Подальше підвищення температури сприяє розриву полімерних ланцюгів з утворенням значної кількості низькомолекулярних сполук, серед яких важливе місце займає ізопрен та його похідні. Одночасно активізуються реакції внутрішньомолекулярної циклізації, що приводять до формування ароматичних вуглеводнів, зокрема ксилолів та інших ароматичних сполук.

За більш високих температур відбувається вторинне перетворення первинних продуктів термічного розкладання. Унаслідок реакцій крекінгу, дегідрування, ізомеризації та ароматизації склад газової та рідкої фракцій поступово ускладнюється, що зумовлює формування широкого спектра вуглеводневих сполук різної молекулярної маси та хімічної будови. Саме ці процеси значною мірою визначають вихід і якість піролізної оливи та газу, отриманих під час термохімічної переробки шинної сировини. Весь процес піролізу відпрацьованих шин показаний на рис. 1.3.

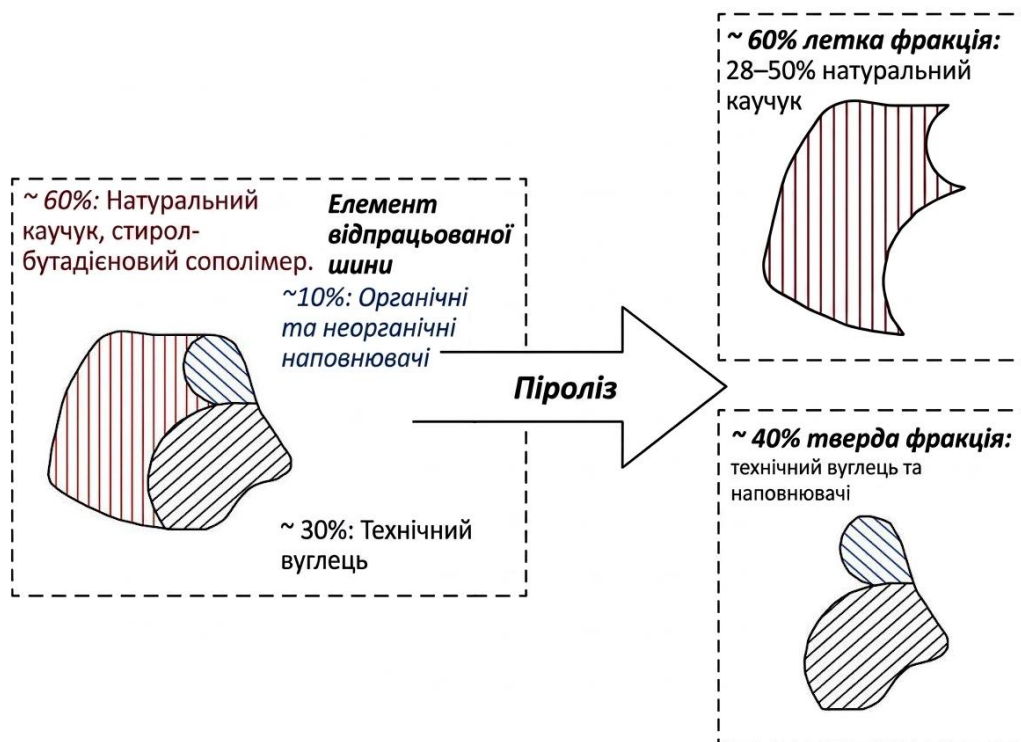


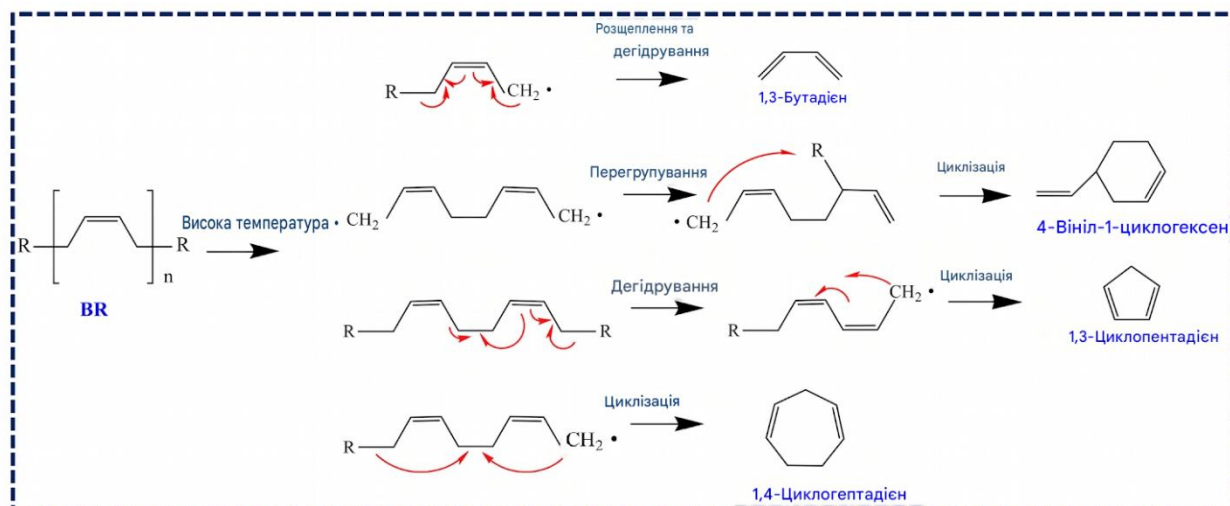
Рисунок 1.3 – Схема піролізу відпрацьованої шини [18]

Фізико-хімічна сутність пічного процесу полягає у високотемпературному термоокиснювальному піролізі рідкої вуглеводневої сировини в потоці газу-теплоносія за умов обмеження доступу кисню. Ефективність цього процесу, а також морфологічні характеристики утворюваних наночастинок (їх дисперсність, питома поверхня та рівень агрегатної структурності), критично залежать від групового хімічного складу вихідних сировинних сумішей. Головним критерієм придатності сировини є високий вміст поліциклічних ароматичних вуглеводнів з мінімальною кількістю алкільних бічних ланцюгів, що математично виражається через індекс кореляції (індекс Бюро копалин США – BMCI) [19]. Високе значення цього індексу гарантує низьку енергію активації реакцій дегідроконденсації та максимальний вихід технічного вуглецю. При цьому наявність у сировині значної кількості аліфатичних вуглеводнів є небажаною, оскільки їх термічний розклад протікає з високим ендотермічним ефектом, що призводить до локального падіння температури в реакційній зоні печі та суттєвого зниження виходу готового продукту.

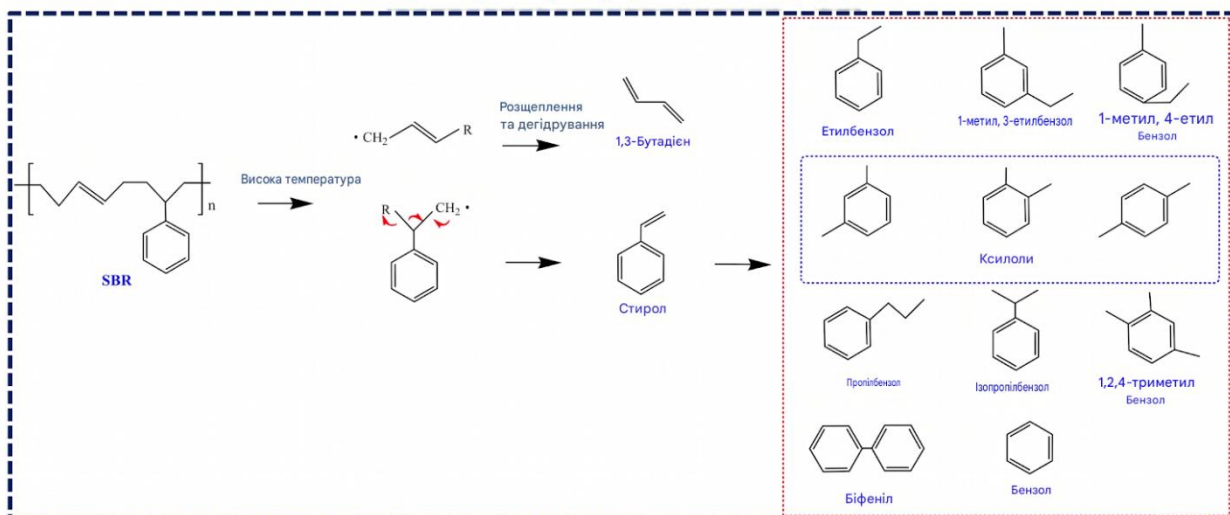
Синтетична каучукова складова відпрацьованих шин представлена переважно бутадієновим (BR) та стирол-бутадієновим (SBR) каучуками, термічна деструкція яких істотно впливає на склад і вихід продуктів піролізу. Встановлено, що механізми їх розкладання характеризуються багатостадійністю та супроводжуються утворенням великої кількості проміжних радикальних частинок [20].

Для бутадієнового каучуку початкові стадії термічного розкладання пов'язані з утворенням вільних радикалів унаслідок розриву полімерних ланцюгів (рис.1.4). Подальші перетворення можуть відбуватися кількома паралельними шляхами. Один із них передбачає реакції деструкції та дегідрування з утворенням 1,3-бутадієну. Інший напрямок включає внутрішньомолекулярні перегрупування та циклізацію радикальних фрагментів, що приводить до формування 4-вініл-1-циклогексену. Крім того, в результаті реакцій дегідрування та циклізації можуть утворюватися 1,3-

циклопентадієн і 1,4-циклогептадієн. Таким чином, термічна деструкція BR супроводжується одночасним перебігом реакцій деполімеризації, дегідрування, циклізації та структурної перебудови вуглеводневих фрагментів.



(а) Механізм піролізу бутадієнового каучуку (BR)



(b) Механізм піролізу стил-бутадієнового каучуку (SBR)

Рисунок 1.4 – Механізм піролізу підготовленої гуми: (а) BR, (b) SBR [20]

Піроліз стил-бутадієнового каучуку характеризується ширшим температурним інтервалом перебігу процесу, який зазвичай охоплює діапазон від приблизно 180 до 500 °С. У процесі термічного розкладання утворюються радикальні фрагменти різної будови. Частина радикалів, що містять чотири атоми Карбону, перетворюється переважно на 1,3-бутадієн, тоді як ароматичні фрагменти зазнають перетворень з утворенням стирену як одного з основних

продуктів деструкції. За підвищених температур між ароматичними сполуками відбуваються вторинні реакції конденсації, циклізації та ароматизації, що сприяє формуванню більш складних ароматичних вуглеводнів.

Отже, особливості термічного розкладання бутадієнового та стирол-бутадієнового каучуків значною мірою визначають склад рідких і газоподібних продуктів піролізу шин. Саме процеси деполімеризації, дегідрування, циклізації та подальших вторинних перетворень зумовлюють утворення широкого спектра аліфатичних, циклічних та ароматичних вуглеводневих сполук, що формують основу піролізної оливи.

Термічне розкладання гумової складової відпрацьованих шин є складним багатостадійним процесом, у якому одночасно відбуваються реакції деструкції полімерного каркаса та трансформації просторової сітки вулканізованого каучуку. Основними напрямками перетворень під час піролізу є розрив макромолекулярних ланцюгів і руйнування поперечних сірковмісних зв'язків, що формують тривимірну структуру вулканізату.

На початкових стадіях термічного впливу найбільш схильними до руйнування є поперечні зшивки, утворені сіркою. Це пояснюється нижчою енергією дисоціації зв'язків S–S порівняно зі зв'язками C–S та C–C. Унаслідок розриву сірковмісних містків відбувається часткова девулканізація матеріалу та утворення реакційноздатних радикальних центрів. Подальше підвищення температури призводить до інтенсивної деструкції основного полімерного ланцюга, насамперед за рахунок розриву зв'язків C–C, що супроводжується утворенням низькомолекулярних вуглеводневих сполук.

Встановлено, що в процесі термолізу значну роль відіграють радикальні механізми [21]. Утворені вільні радикали можуть вступати в реакції рекомбінації, перенесення атомів водню, диспропорціонування та циклізації. Наслідком цих процесів є формування широкого спектра газоподібних і рідких продуктів, а також вторинних структур у твердому залишку. Дані спектроскопічних досліджень свідчать, що продукти піролізу часто

утворюються шляхом відщеплення від макромолекули окремих мономерних або олігомерних фрагментів, що підтверджує переважання механізму деструкції полімерного ланцюга.

Для природного каучуку характерним є те, що в температурному інтервалі приблизно 280–300 °С спостерігається інтенсивне руйнування вулканізаційних зв'язків, тоді як за вищих температур суттєво зростає швидкість деструкції основного ланцюга полімеру. Із збільшенням тривалості термічної обробки процес розщеплення макромолекул стає домінуючим, а внесок реакцій повторного зшивання поступово зменшується [22]. Крім того, під час нагрівання можливі структурні перетворення ізопренових фрагментів, зокрема реакції цис-транс-ізомеризації.

Загалом піроліз відпрацьованих шин являє собою комплекс взаємопов'язаних фізико-хімічних перетворень, що включають розрив хімічних зв'язків, радикальні реакції, утворення проміжних сполук та вторинні перетворення продуктів деструкції. Через багатокomпонентність шинної сировини та значну кількість паралельних і послідовних реакцій повний опис процесу за допомогою окремих хімічних рівнянь є неможливим. Водночас аналіз матеріального балансу та кінетичних закономірностей дозволяє розробляти узагальнені моделі процесу, які можуть бути використані для прогнозування виходу та складу продуктів піролізу, а також для оптимізації технологічних параметрів промислових установок.

Проведені в останні роки дослідження реологічних та фізико-хімічних властивостей сировинних сумішей із додаванням піролізної оливи дозволили встановити закономірності їх впливу на технологічний процес виробництва технічного вуглецю популярної марки N660 [23]. Згідно з дослідними даними, під час введення оливи у кількості 5 мас. % густина суміші знижується незначно (з 1,163 до 1,156 г/см³), а показники динамічної та кінематичної в'язкості в усьому технологічному температурному діапазоні (50–80 °С) залишаються стабільними і не виходять за межі експериментальної похибки. Це є критично важливим фактором, оскільки стабільність в'язкості гарантує

збереження штатних параметрів гідродинамічного розпилення сировини через форсунки реактора і не потребує дороговартісної заміни насосного обладнання.

Крім того, кінетика випаровування крапель модифікованої сировини в порожнині реактора кардинально відрізняється від поведінки чистих нафтових фракцій. ШПО, маючи ширший фракційний склад та наявність як легких, так і важких смолистих компонентів, демонструє ефект мікрофракціонування безпосередньо у краплі. Леткі фракції випаровуються майже миттєво, утворюючи гази, які сприяють швидкому спалаху, тоді як важкі конденсовані ядра залишаються в центрі краплі, проходячи стадію глибокої карбонізації. Такий ступінчастий механізм дозволяє інтенсифікувати процес утворення технічного вуглецю навіть за дещо нижчих температур, що є значною технологічною перевагою.

Збільшення частки піролізної оливи до 10 мас. % викликає суттєве розрідження системи: кінематична в'язкість за 50 °C зменшується з 113 до 88 сСт, що обумовлено високим вмістом низькокиплячих ароматичних компонентів у піролізній оливі. Таке зниження в'язкості покращує якість дифузійного диспергування струменя сировини, сприяючи формуванню дрібніших крапель. Промислові випробування доводять, що використання 5 мас. % ШПО забезпечує стабільну роботу реактора: температура в зоні горіння (близько 1544 °C) та зоні гартування (518 °C) практично не змінюється відносно базового режиму, а незначне зниження температури в реакційній зоні на 26 °C є некритичним.

Варто також відзначити вплив хімічного складу піролізної оливи на кінетику формування поверхні частинок технічного вуглецю. Наявність у піролізній оливі гетероатомних сполук та специфічних радикалів сприяє утворенню додаткових активних центрів на поверхні зростаючих агрегатів. Це безпосередньо впливає на процес їх просторової коагуляції. У реакційній камері, де час перебування частинок вимірюється мілісекундами, швидкість зіткнення та зрощення первинних глобул визначає кінцеву структурність

продукту. Оптимально підібрана частка оливи відіграє роль своєрідного каталізатора структуроутворення, що дозволяє отримувати технічний вуглець з високим числом поглинання оливи без необхідності додаткового впорскування розчинів лужних металів, які традиційно використовуються для придушення надмірної структурності.

Найголовнішим досягненням є те, що фізико-хімічні показники отриманого технічного вуглецю марки N660 за умов додавання альтернативної сировини повністю відповідають нормативним вимогам. Число адсорбції становить 38,8 мг/г, що підтверджує високу питому поверхню та дисперсність частинок. Число поглинання оливи ($91,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$) та число поглинання оливи після ущільнення ($72,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$) вказують на формування розвиненої агрегатної структури, здатної забезпечити необхідні підсилювальні та фізико-механічні властивості гумових композицій [24].

1.3 Математичне та комп'ютерне моделювання процесів горіння у реакторах технічного вуглецю

Сучасні дослідження свідчать, що математичне та комп'ютерне моделювання стало невід'ємною складовою розроблення реакторів отримання технічного вуглецю нового покоління. Якщо раніше основна увага приділялася розрахунку теплових режимів, то нині моделі охоплюють весь ланцюг процесів: від горіння палива та піролізу вуглеводневої сировини до формування морфології частинок технічного вуглецю. Особливо перспективним напрямом є поєднання CFD-моделювання, моделей утворення сажі та технологій штучного інтелекту, що дозволяє створювати цифрові двійники промислових установок. Такі підходи забезпечують прогнозування якості продукції, оптимізацію витрат сировини та енергії, а також скорочення часу розроблення нових марок технічного вуглецю. Для сучасної промисловості цифрове моделювання фактично стає основним інструментом підвищення ефективності та керованості процесів виробництва технічного вуглецю.

Впровадження модифікованих сировинних сумішей із новими реологічними та теплофізичними характеристиками вимагає детального вивчення змін у внутрішній гідродинаміці та теплообміні реакторного блоку. Зміна складу палива або сировини безпосередньо впливає на геометрію та довжину факела, швидкість випаровування рідких крапель вуглеводнів та топографію температурних полів усередині камери реактора. Оскільки інструментальний контроль процесів у закритому реакційному просторі за температур понад 1500–2000 °C є технічно небезпечним та економічно невиправданим, провідним методом сучасних досліджень стає комп'ютерне моделювання [].

У сучасній інженерній практиці хімічної технології оптимізація конструкцій пальникових пристроїв [25] (рис. 1.5) та режимів спалювання альтернативних сумішей реалізується за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics).

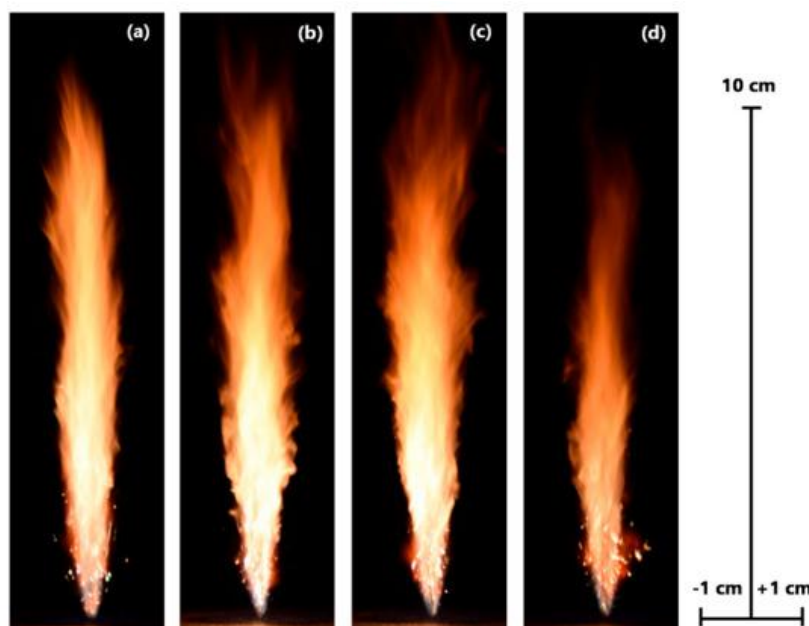


Рисунок 1.5 – Зображення динаміки полум'я в реакторі отримання технічного вуглецю [25]

Чисельне розв'язання тривимірних диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, законів збереження маси, енергії та переносу компонентів хімічних

реакцій дозволяє з високою точністю прогнозувати поведінку багатофазних потоків та зон турбулентності [26].

Основою математичного апарату CFD-моделювання є система нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних. До базової математичної моделі входять рівняння неперервності (закон збереження маси), рівняння Нав'є-Стокса (яке описує збереження імпульсу для в'язкого стисливого газу), а також рівняння збереження енергії та транспорту компонентів хімічних реакцій. Враховуючи екстремально високі числа Рейнольдса (Re), характерні для пальникових пристроїв печей технічного вуглецю, пряме чисельне моделювання (DNS) є обчислювально неможливим для промислових масштабів. Тому на практиці застосовують рівняння Рейнольдса усереднених за часом (RANS) у комбінації з напівемпіричними моделями турбулентності. Для адекватного опису закручених потоків та відривних течій поблизу вогнетривких стінок реактора найчастіше використовується модель Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$, яка поєднує переваги класичної $k-\epsilon$ моделі у вільному потоці та $k-\omega$ моделі у пристінному шарі [27].

Окрім гідродинамічних розрахунків, CFD-комплекси дозволяють враховувати процеси радіаційного теплообміну, які домінують у високотемпературних реакторах (за температур понад 1000 °C частка променистого теплообміну може сягати 90% від загального теплового потоку). Використання моделі дискретних ординат (DO) або моделі P1 дозволяє коректно розрахувати перенос випромінювання від розпеченого факела та частинок дисперсного вуглецю, що утворюються, до вогнетривкої футеровки стінок камери []. Це дає змогу точно визначати зони максимального термічного навантаження на вогнетриви і проектувати оптимальну конфігурацію системи охолодження або «гартування» (quenching), де впорскується хімічно очищена вода для різкої зупинки реакцій утворення технічного вуглецю.

Використання передових програмних комплексів, зокрема Simcenter STAR-CCM+, дає змогу віртуально відтворити аеродинамічні умови всередині печного реактора. CFD-моделювання дозволяє детально проаналізувати турбулентне змішування модифікованої сировини або альтернативного газу з повітрям високого тиску, встановити зони максимального тепловиділення та оптимізувати співвідношення «паливо-повітря». Це забезпечує можливість проведення глибокого наукового аналізу, дозволяючи обґрунтувати кінетику утворення технічного вуглецю без проведення вартісних промислових експериментів, мінімізуючи ризики термічного пошкодження вогнетривкої футеровки промислового обладнання та прискорюючи перехід підприємства на нові види сировини.

Simcenter STAR-CCM+ дозволяє створювати тривимірні цифрові моделі реакторів технічного вуглецю з урахуванням реальної геометрії:

- камери горіння;
- інжекторів палива;
- форсунок подачі сировини;
- реакційної зони;
- секцій гартування;
- систем відведення продуктів.

У результаті розрахунків формується повна картина розподілу швидкостей, температур і концентрацій компонентів у будь-якій точці реактора.

Однією з ключових переваг Simcenter STAR-CCM+ є можливість детального аналізу турбулентних потоків. У реакторах технічного вуглецю турбулентність визначає інтенсивність змішування палива з окисником; рівномірність температурного поля; швидкість прогрівання сировини; час перебування прекурсорів у реакційній зоні. Для опису течії можуть використовуватися моделі:

- k-ε Realizable;

- RNG k - ϵ ;
- k - ω SST;
- Reynolds Stress Model (RSM);
- Large Eddy Simulation (LES).

Особливо перспективним для дослідження формування технічного вуглецю є підхід LES, який дозволяє моделювати великомасштабні вихори та їх вплив на локальні умови утворення частинок.

Програмний комплекс підтримує широкий спектр моделей горіння Eddy Break-Up (EBU), Eddy Dissipation Concept (EDC), Flamelet Generated Manifold (FGM), Finite Rate Chemistry, PDF Combustion Models.

Для реакторів технічного вуглецю особливо важливим є врахування взаємодії турбулентності та хімічних реакцій. Це дозволяє визначати положення факела, максимальну температуру горіння, розподіл кисню, ступінь неповного окиснення.

Температура є одним із головних параметрів, що визначають якість технічного вуглецю. За допомогою Simcenter STAR-CCM+ можна прогнозувати локальні температури по довжині реактора, температурні градієнти, теплові втрати через стінки, ефективність системи гартування.

Віртуальний аналіз дозволяє визначити оптимальне положення форсунок та точки введення води для гартування, що особливо важливо для контролю структури технічного вуглецю.

Найбільш цінною для сучасних досліджень є можливість моделювання процесів сажеутворення. У Simcenter STAR-CCM+ можуть використовуватися моделі зародження частинок (Nucleation Models), моделі поверхневого росту (Surface Growth Models), моделі коагуляції та агломерації, Population Balance Models (PBM), Lagrangian Particle Tracking. Застосування таких моделей дозволяє прогнозувати середній діаметр первинних частинок, розподіл частинок за розмірами, фрактальну структуру агрегатів, концентрацію технічного вуглецю, ступінь агломерації.

Для процесів на основі піролізної оливи відпрацьованих шин це особливо важливо, оскільки склад сировини суттєво впливає на механізми утворення поліциклічних ароматичних вуглеводнів та подальше формування вуглецевих частинок.

Використання цифрової моделі реактора дозволяє без проведення дорогих експериментів досліджувати вплив температури горіння співвідношення паливо/повітря, витрати піролізної оливи, швидкості подачі реагентів, часу перебування продуктів у реакторі, положення форсунок. В результаті можна визначити режими, що забезпечують одержання технічного вуглецю з необхідними показниками BET-поверхні, STSA-поверхні, DBP-поглинання, середнього діаметра агрегатів, структурності.

Одним із найновіших напрямів застосування Simcenter STAR-CCM+ є створення цифрових двійників (Digital Twin) виробничих установок. Поєднання CFD-моделі з даними промислових датчиків дозволяє прогнозувати якість продукції в режимі реального часу, контролювати стабільність технологічного процесу, оптимізувати енергоспоживання, зменшувати витрати сировини, прогнозувати відхилення параметрів роботи реактора.

Програмний комплекс Simcenter STAR-CCM+ є сучасним високоефективним інструментом чисельного моделювання процесів виробництва технічного вуглецю. Його застосування дозволить відтворювати аеродинамічні умови всередині реактора, аналізувати процеси турбулентного змішування та горіння, прогнозувати температурні поля й концентрації реагентів, а також моделювати кінетику утворення та агрегації частинок технічного вуглецю. Особливо перспективним є його використання для розроблення реакторів, що працюють на піролізній оливі відпрацьованих шин, оскільки він дає можливість встановлювати взаємозв'язок між складом сировини, режимами процесу та характеристиками отриманого технічного вуглецю ще на стадії віртуального проектування, що значно скорочує обсяг експериментальних досліджень і витрати на розробку технології.

2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

Визначали фізико-хімічні характеристики піролізної оливи та технічного вуглецю відповідно до чинних міжнародних і гармонізованих в Україні стандартів. Показники зведено до узагальненої табл.2.1 з обґрунтуванням кожного показника.

Показник	Стандарт	Сутність методу	Наукове значення показника
1	2	3	4
Густина за 20 °С, г/см ³	ДСТУ EN ISO 12185:2017; ДСТУ ASTM D4052	Визначення густини цифровим вібраційним денсиметром	Характеризували склад піролізної оливи та вміст ароматичних компонентів
Динамічна в'язкість, мПа·с	ДСТУ EN 16896; ISO 3219	Вимірювання опору рідини зсувним деформаціям ротаційним віскозиметром	Визначали реологічні властивості піролізної оливи, вплив на процеси розпилення та горіння у реакторах технічного вуглецю
Кінематична в'язкість, мм ² /с	ДСТУ EN ISO 3104:2021	Визначення часу протікання рідини через капілярний віскозиметр за контрольованої температури	Є одним із основних показників придатності оливи як вуглецевмісної сировини для процесів піролізу та горіння
Число адсорбції йоду, мг/г	ASTM D1510	Визначення кількості йоду, адсорбованого поверхнею технічного вуглецю	Характеризує ступінь розвитку поверхні та непрямо корелює з розміром первинних частинок технічного вуглецю.
Число поглинання оливи (OAN), см ³ /100 г	ASTM D2414	Визначення кількості стандартної оливи, що поглинається структурою технічного вуглецю	Відображали структурність агрегатів технічного вуглецю та ступінь їх розгалуження.
Число поглинання оливи після ущільнення (COAN), см ³ /100 г	ASTM D3493	Визначення поглинання оливи після механічного ущільнення зразка	Дає можливість оцінити стійкість структури агрегатів до механічного навантаження та транспортування.

Продовження табл.2.1

1	2	3	4
Статистична товщина питомої поверхні (STSA), м ² /г	ASTM D6556	Розрахунок зовнішньої поверхні частинок за даними адсорбції азоту	Характеризували доступну зовнішню поверхню агрегатів без урахування внутрішніх пор
Питома поверхня за адсорбцією азоту (BET), м ² /г	ISO 9277:2022; ДСТУ ISO 9277	Визначення питомої поверхні методом Брунауера-Еммета-Теллера за ізотермами адсорбції азоту	Один із головних параметрів якості технічного вуглецю, що визначає його підсилювальну здатність у гумових композиціях.

Комплекс наведених показників дозволив охарактеризувати як рідку піролізну сировину, так і отриманий технічний вуглець. Для піролізної оливи найбільше значення мали густина та в'язкість, оскільки саме вони визначають умови транспортування, диспергування та змішування з окиснювачем у реакторі. Зростання густини та в'язкості зазвичай свідчить про підвищений вміст важких ароматичних сполук, які можуть бути джерелом утворення більшої кількості частинок технічного вуглецю.

Для технічного вуглецю визначальними є показники питомої поверхні та структурності. Число адсорбції йоду і BET-поверхня характеризують дисперсність частинок та їхню активну поверхню. Зі збільшенням цих показників підвищується підсилювальна здатність технічного вуглецю в еластомерних композиціях.

Число поглинання оливи (OAN) і число поглинання оливи після ущільнення (COAN) є основними параметрами, що характеризують структуру агрегатів технічного вуглецю та їхню здатність утворювати просторовий каркас у полімерній матриці. Високі значення OAN відповідають більш розгалуженим агрегатам із розвиненою структурою, тоді як різниця між OAN та COAN відображає міцність агрегатної будови.

Показники STSA та BET доповнюють один одного. STSA характеризує переважно зовнішню поверхню агрегатів, тоді як BET враховує сумарну доступну поверхню, включаючи поровий простір. Спільний аналіз цих

параметрів дозволив оцінити морфологію та ступінь агрегації частинок технічного вуглецю, що є важливим при порівнянні відновленого технічного вуглецю із промисловими марками технічного вуглецю ASTM N220–N660.

Для дослідження гідродинамічних, теплових та фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час одержання технічного вуглецю з використанням піролізної оливи відпрацьованих шин як вуглеводневої сировини, було застосовано програмний комплекс Simcenter STAR-CCM+, який дозволяє виконувати чисельне моделювання турбулентних реагуючих потоків із врахуванням тепломасообміну, випромінювання та багатофазних процесів.

Розрахункова модель реактора була побудована в осесиметричній двовимірній постановці (2D Axisymmetric), що є поширеним підходом при дослідженні циліндричних реакторів виробництва технічного вуглецю. Такий підхід забезпечує суттєве зменшення обчислювальних витрат порівняно з повною тривимірною моделлю з одночасним збереженням достатньої точності опису основних процесів усередині реакційного простору. Розрахунки виконувалися в стаціонарному режимі (Steady State), який відповідає усталеним умовам роботи промислового реактора. Для досягнення збіжності рішення було встановлено максимальну кількість – 7000 ітерацій.

Газова фаза в реакторі моделювалася як багатокомпонентна суміш, що включала водень (H_2), азот (N_2), оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO_2), водяну пару (H_2O), діоксид сірки (SO_2), кисень (O_2) та леткі продукти термічного розкладання вуглеводневої сировини, представлені узагальненим компонентом CoalVolatile. Такий підхід дозволив адекватно описувати склад газової фази, характерний для процесів термічної деструкції та часткового окиснення піролізної оливи.

Тверда фаза була представлена дискретними частинками вуглецевого матеріалу, структура яких включала чотири складові: вихідну вуглецевмісну речовину, коксовий залишок, зольну частину та вологу. Така багатокомпонентна модель дозволила враховувати послідовні стадії

термічного перетворення частинок і формування твердого вуглецевого залишку.

Подача реагентів до реактора здійснювалася через два вхідні канали. Через центральний пальниковий пристрій подавалася суміш піролізного газу або природного газу для порівняння з транспортним повітрям зі швидкістю 23 м/с за температури 343,15 К. Масова частка азоту в повітрі становила 76,7 %, а кисню – 23,3 %. Через периферійний канал надходило вторинне повітря температурою 300 К, необхідне для підтримання процесів часткового окиснення та стабілізації температурного режиму. Профіль швидкості вторинного повітря задавався нерівномірним відповідно до радіального розподілу потоку, що наближало модель до реальних умов експлуатації реактора.

Температурні умови на поверхнях реактора задавалися на основі характерних технологічних параметрів процесу виробництва технічного вуглецю. Температура циліндричної частини реактора та фронтальної стінки становила 1400 К, що відповідає високотемпературній зоні формування частинок технічного вуглецю. Температура задньої стінки та вихідного каналу підтримувалася на рівні 1300 К. Для моделювання впливу охолоджувальних контурів температура відповідних поверхонь задавалася постійною і становила 1000 К. На всіх твердих межах використовувалася умова прилипання потоку (No-Slip Condition), яка враховує вплив тертя газового потоку об поверхню стінок.

Для опису фізико-хімічних перетворень у реакторі було враховано комплекс взаємопов'язаних реакцій. На початковій стадії відбувалося виділення летких продуктів із піролізної сировини. У подальшому леткі компоненти вступали в реакцію з киснем із утворенням продуктів окиснення. Одночасно враховувалися реакції окиснення оксиду вуглецю до діоксиду вуглецю, а також гетерогенне окиснення твердого коксового залишку. Сукупність зазначених реакцій забезпечувала відтворення характерних

особливостей формування температурного поля та концентраційних розподілів у реакторі.

Обчислювальна область була дискретизована за допомогою структурованої розрахункової сітки, що містила 20716 контрольних об'ємів. Базовий розмір комірки становив 0,03 м. Для підвищення точності опису пристінних ефектів біля поверхонь було сформовано два призматичні шари згущення сітки. Такий підхід дозволяє коректно визначати градієнти швидкості, температури та концентрацій поблизу стінок реактора.

Турбулентний рух газового середовища описувався за допомогою моделі Realizable $k-\varepsilon$, яка широко застосовується під час моделювання високотемпературних реагуючих потоків у промислових печах та реакторах. Зазначена модель забезпечила задовільну точність прогнозування процесів змішування, циркуляції та турбулентного переносу імпульсу і тепла.

Перенесення теплового випромінювання враховувалося за допомогою методу дискретних ординат (Discrete Ordinates Method). Це дозволяло врахувати значний внесок променистого теплообміну у високотемпературному середовищі реактора, де температура продуктів горіння перевищує 1300–1400 K.

За результатами моделювання визначалися поля швидкостей, температур, концентрацій компонентів газової суміші, інтенсивність турбулентності, теплові потоки до стінок реактора, а також кількісні характеристики утворення технічного вуглецю. На виході з реактора проводився аналіз масових потоків газоподібних продуктів, твердих вуглецевих частинок та зольного залишку, що дозволяло оцінити ефективність процесу та вплив технологічних параметрів на формування кінцевого продукту.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На виробничих потужностях Кременчуцького заводу технічного вуглецю проведено серію промислових випробувань, спрямованих на оцінювання можливості часткової заміни традиційної вуглеводневої сировини альтернативними компонентами вторинного походження. У межах дослідження сформовано дослідну сировинну композицію, до складу якої введено шинну піролізну оливу у кількості 5 і 10 мас. %.

Вибір зазначеного співвідношення обумовлений необхідністю збереження стабільності технологічного процесу термоокиснювального розкладання вуглеводнів, а також мінімізації ризиків відхилення від регламентних параметрів роботи реакторного обладнання. Шинна піролізна олива розглядалася як потенційно ефективний компонент завдяки високому вмісту ароматичних і конденсованих вуглеводневих структур, що є сприятливими прекурсорами утворення технічного вуглецю.

Промислові випробування здійснювалися в умовах, максимально наближених до штатного технологічного режиму, із контролем основних параметрів процесу, зокрема температури реакційної зони, витрати сировини, співвідношення «паливо–повітря», а також характеристик утворюваного продукту. Отримані дослідні зразки технічного вуглецю підлягали подальшому аналізу з метою визначення їх фізико-хімічних показників, включаючи дисперсність, структурність, питому поверхню та вміст летких речовин.

Результати, які наведено в табл. 3.1, свідчать про закономірний вплив введення ШПО на реологічні та фізичні властивості сировинної суміші для виробництва технічного вуглецю марки N660. Передусім встановлено незначне зниження густини сировини зі збільшенням частки ШПО: від 1,163 г/см³ для традиційної сировини до 1,156 г/см³ під час введення 5 % ШПО та до 1,152 г/см³ при 10 % ШПО. Така тенденція може бути пояснена меншою

середньою молекулярною масою та більшою часткою легких фракцій у складі піролізної оливи порівняно з традиційною нафтовою сировиною.

Таблиця 3.1 – Результати експериментального дослідження додавання ШПО у сировинну суміш під час виробництва технічного вуглецю марки N660

Найменування продукту	Густина за температури 20° С, г/см ³	Динамічна в'язкість			Кінематична в'язкість, сСт		
		80° С	60° С	50° С	80° С	60° С	50° С
Сировина традиційна	1,163	42	76	130	37	67	113
Сировина ШПО +5%	1,156	43	77	128	38	68	113
Сировина ШПО +10%	1,152	38	66	100	34	59	88

Більш суттєві зміни спостерігаються у показниках в'язкості. При введенні 5 % ШПО динамічна та кінематична в'язкість практично не змінюються відносно базової сировини: при температурах 80, 60 і 50 °С відхилення знаходяться в межах експериментальної похибки ($\pm 1-2$ од.), що свідчить про збереження реологічної поведінки системи та стабільність умов розпилення сировини у реакторі. Це важливо з технологічної точки зору, оскільки в'язкість визначає диспергування струменя та, відповідно, кінетику утворення частинок технічного вуглецю.

Натомість зі збільшенням вмісту ШПО до 10 % спостерігається істотне зниження як динамічної, так і кінематичної в'язкості по всьому температурному діапазону. Зокрема, динамічна в'язкість зменшується приблизно на 10 – 25 % (з 42 до 38 при 80 °С, з 76 до 66 при 60 °С, з 130 до 100 при 50 °С), а кінематична – на 10 – 22 % (з 37 до 34; з 67 до 59; з 113 до 88 сСт, відповідно). Це вказує на суттєве розрідження сировинної системи, що може бути зумовлено підвищенням вмістом низькокиплячих та менш асоційованих ароматичних компонентів у ШПО.

З технологічної точки зору зниження в'язкості у випадку 10 % введення ШПО може мати подвійний ефект. З одного боку, покращується розпилення сировини, що сприяє формуванню більш дисперсного аерозолі та інтенсифікації процесів термічного розкладання. З іншого боку, надмірне зниження в'язкості може призводити до зміни гідродинаміки факела, скорочення часу перебування частинок у високотемпературній зоні та, як наслідок, впливати на структурні характеристики технічного вуглецю.

З метою встановлення впливу введення ШПО до сировинної суміші для виробництва технічного вуглецю марки N660 на технологічні параметри роботи реакторного блоку, а також оцінки можливостей подальшого промислового масштабування процесу, було проведено промислові випробування із додаванням 5 мас. % ШПО. Отримані результати зведено до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вплив введення 5 мас. % шинної піролізної оливи на технологічні параметри процесу виробництва технічного вуглецю марки N660

Параметри	Випробування				Обробка результатів	
	без ШПО	з 5% мас. ШПО				
Температура:		1	2	3	середнє	відхилення
зона горіння	1545	1540	1560	1533	1544	1
зона реакції	1400	1540	1560	1533	1374	26
зона гартування	500	510	520	525	518	−18
Витрата, кг/год:						
газу на горіння	50	50	50	50	50	0
сировини на аксіальний вхід	350	340	330	350	340	10
сировини на радіальний вхід	3550	3550	3550	3550	3550	0
повітря високого тиску на розпил	327	330	330	329	330	−3
повітря середнього тиску	5400	330	330	329	5450	−50
Тиск у реакторі	2800	2730	2800	2930	2820	−20
Підкачка КОН	8	7,5	10,5	10,5	9,5	−2

Результати промислових випробувань свідчать, що введення 5 мас. % ШПО до складу сировинної суміші не спричинило суттєвих порушень технологічного режиму роботи реакторного блоку та може розглядатися як технологічно допустиме.

Аналіз температурних параметрів показав збереження стабільності процесу в основних функціональних зонах реактора. У зоні горіння середня температура практично не відрізнялася від базового режиму без використання ШПО, що свідчить про відсутність негативного впливу альтернативної сировини на процеси горіння та тепловиділення. У реакційній зоні спостерігалось певне зниження температури на 26°C , що може бути пов'язано зі зміною теплофізичних характеристик сировинної композиції, зокрема внаслідок присутності більш легких та ароматичних компонентів піролізної оливи. Проте така зміна не є критичною для процесу утворення технічного вуглецю та не виходить за межі допустимих технологічних коливань. У зоні гартування температурний режим залишався стабільним, що підтверджує відсутність негативного впливу ШПО на завершальну стадію формування продукту та його охолодження.

Дослідження витратних показників також підтвердило стабільність роботи установки. Витрата природного газу на горіння залишалася незмінною, що свідчить про відсутність додаткової потреби в енергетичних ресурсах при використанні ШПО. Подача сировини на радіальний вхід також не зазнала змін, що підтверджує збереження основного технологічного навантаження на реактор. Водночас для аксіальної подачі сировини відзначалося незначне зниження витрати, що може свідчити про покращення умов розпилення та більш ефективне диспергування сировинної суміші за рахунок зміни її реологічних властивостей. Показники витрати повітря високого та середнього тиску залишалися в межах нормативних значень, що підтверджує адаптивність технологічної системи до введення нового компонента без необхідності суттєвого коригування режимів роботи.

Тиск у реакторі також характеризувався стабільністю та не демонстрував критичних відхилень порівняно з традиційним режимом виробництва. Незначні коливання цього показника перебували в межах технологічно допустимих значень і не впливали на безпечність та ефективність процесу. Аналогічно, зміни у витраті лужного реагенту (KOH) мали незначний характер і можуть розглядатися як нормальні виробничі коливання.

Отримані результати підтверджують, що використання 5 мас. % шинної піролізної оливи у складі сировини для виробництва технічного вуглецю марки N660 є технологічно обґрунтованим і не потребує суттєвого перегляду регламентних параметрів роботи реакторного блоку. Збереження стабільності температурного режиму, тиску та основних витратних характеристик свідчить про можливість подальшого масштабування такого підходу та розширення сировинної бази виробництва за рахунок вторинних ресурсів.

Результати аналізу показників якості технічного вуглецю марки N660, отриманого із використанням сировинної суміші з додаванням шинної піролізної оливи, що характеризують його структурність, дисперсність та поверхневу активність, наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати фізико-хімічних показників технічного вуглецю марки N660 на сировинній суміші з додаванням ШПО

Параметри	норма	факт
Число адсорбції йоду, г/кг	31 – 41	38,8
число абсорбції оливи, см ³ /100 г	85 – 95	91,8
число абсорбції оливи стислого зразка, см ³ /100 г	69 – 79	72,8
статистична товщина питомої поверхні, м ² /г	28 – 40	35,3
питома поверхня за адсорбцією азоту, м ² /г	29 – 41	35,9
площа мікропор на поверхні частинок, м ² /г	–	0,6

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.3, свідчить, що використання ШПО у складі сировинної суміші для виробництва технічного вуглецю марки N660 не призводить до погіршення його основних фізико-хімічних показників, а отриманий продукт повністю відповідає нормативним вимогам для даної марки .

Показник числа адсорбції йоду становить 38,8 г/кг свідчить про достатньо розвинену активну поверхню частинок технічного вуглецю. Це підтверджує належний рівень дисперсності продукту та його здатність забезпечувати ефективну взаємодію з полімерною матрицею під час використання у гумових сумішах.

Число абсорбції оливи (поглинання оливи), яке характеризує структурність агрегатів технічного вуглецю, становить 91,8 см³/100 г і також знаходиться в межах встановленої норми. Отримане значення свідчить про добре розвинену агрегатну структуру та достатню здатність частинок утворювати просторову сітку в еластомерних композиціях, що є важливим для забезпечення механічної міцності гумових виробів.

Показник числа абсорбції оливи стислого зразку підтверджує збереження структурності після механічного навантаження та характеризує стабільність первинної агрегатної будови технічного вуглецю.

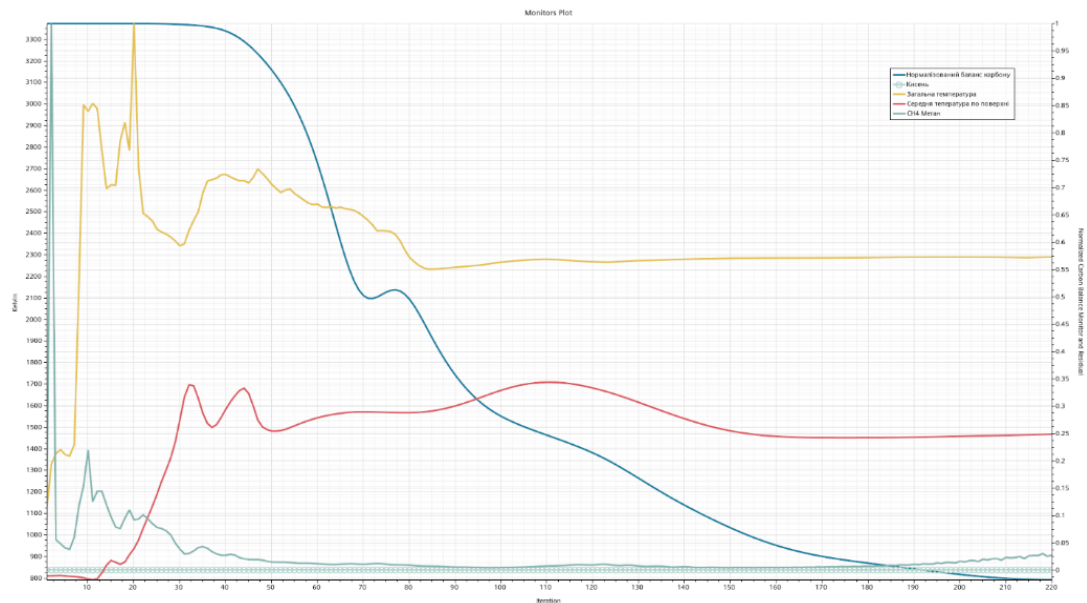
Значення статистичної товщини питомої поверхні на рівні 35,3 м²/г та питомої поверхні за адсорбцією азоту – 35,9 м²/г також відповідають нормативним вимогам і свідчать про стабільний рівень дисперсності та однорідності частинок. Близькі значення показників та невелика площа мікропор вказують на рівномірність поверхневої структури та відсутність суттєвих дефектів у формуванні частинок під час процесу термоокиснювального розкладання сировини.

Отримані результати підтверджують, що часткове заміщення традиційної вуглеводневої сировини ШПО не лише не погіршує якісні характеристики технічного вуглецю марки N660, але й забезпечує збереження необхідного рівня структурності, дисперсності та поверхневої активності продукту. Це

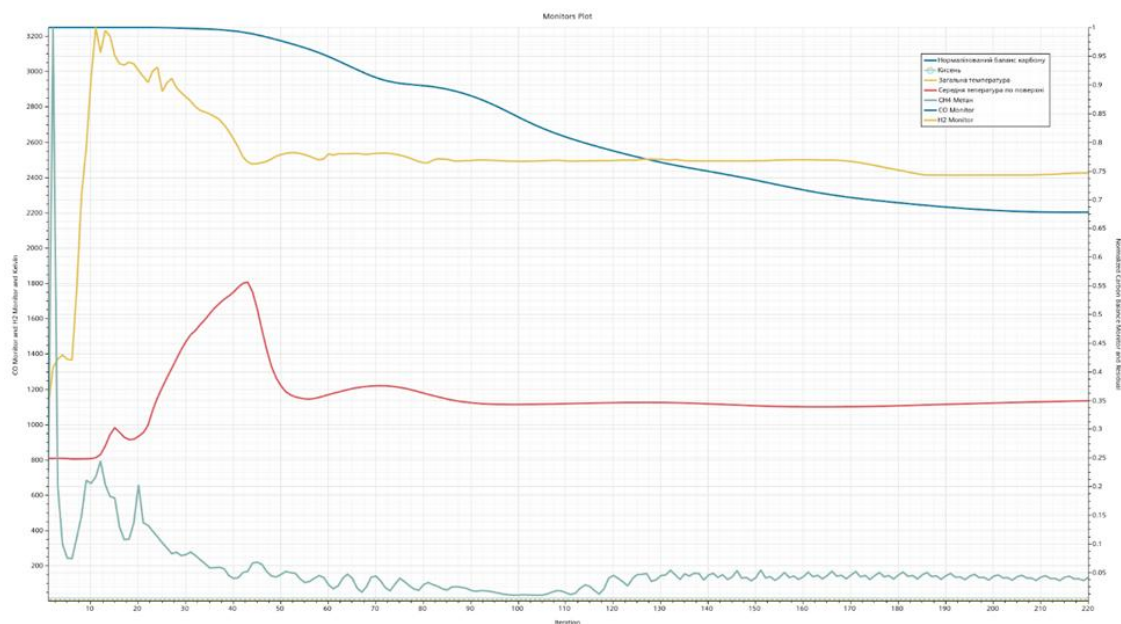
свідчить про технологічну доцільність використання ШПО як альтернативного компонента сировинної суміші та підтверджує перспективність подальшого масштабування такого підходу в промислових умовах.

Для оцінки можливості використання піролізного газу в ректорі з виробництва технічного вуглецю провели комплексне дослідження теплотехнічних та аеродинамічних характеристик паливної зони реактора. Використовували чисельне моделювання порівняльних процесів горіння природного газу та газу піролізу відпрацьованих шин у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Досліджено температурні поля, швидкісні характеристики, структуру течії, теплове навантаження на внутрішню поверхню реактора, стабільність факела горіння та зміну нормалізованого балансу карбону. Отримані результати дозволили оцінити ефективність застосування піролізного газу як альтернативного палива та визначити основні обмеження і перспективи його практичного використання у виробництві пічного технічного вуглецю.

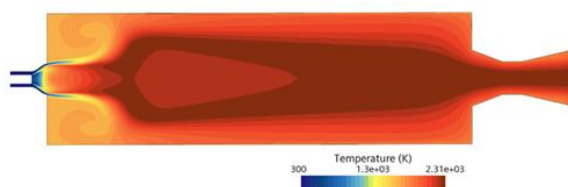
За результатами моделювання (рис. 3.2 а, б) встановлено, що для обох паливних систем формуються високотемпературні реакційні зони з максимальними температурами на рівні $2,35 \cdot 10^3$ К. При цьому, температура реакційного потоку під час використання піролізного газу є приблизно на 40 К вищою, що свідчить про достатній теплотворний потенціал альтернативного палива для забезпечення процесу утворення технічного вуглецю. Водночас характер температурного поля суттєво відрізняється. Для природного газу зона максимальної температури локалізована переважно в прифакельній області з подальшим поступовим зниженням температури вздовж реактора. Для піролізного газу високотемпературна область є значно ширшою та більш протяжною, що свідчить про більш рівномірний розподіл тепловиділення по довжині реакційного об'єму.



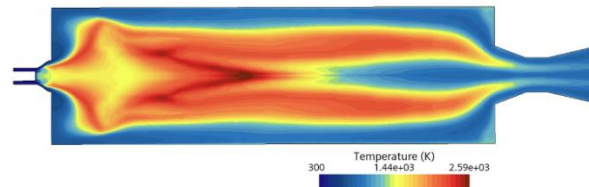
а)



б)



а)



б)

Рисунок 3.2 – Візуалізація результатів моделювання процесу горіння в топковій зоні реактора виробництва технічного вуглецю, де в якості палива використано а) природний газ; б) газ піролізу відпрацьованих шин

Моніторинг середньої температури внутрішньої поверхні печі показав, що у випадку природного газу після стабілізації процесу температура поверхні становить приблизно 1100–1150 К, тоді як під час використання піролізного газу вона підвищується до 1450–1500 К із локальними максимумами близько 1700 К на перехідних режимах. Таким чином, середня температура футеровки із застосуванням піролізного газу є орієнтовно на 300–350 К вищою. Це вказує на інтенсивніший радіаційний теплообмін та підвищене теплове навантаження на внутрішню поверхню реактора. Разом із тим графіки демонструють, що після приблизно 120–140 ітерацій температурний профіль стабілізується, а амплітуда коливань температури поверхні не перевищує ± 20 –30 К, що можна вважати прийнятним для стаціонарного режиму роботи.

Важливим критерієм є нормалізований баланс карбону. Для природного газу після стабілізації процесу це значення становить 0,68–0,70. Для газу піролізу показник знижується до 0,55–0,58. Отже, спостерігається зменшення ефективності перетворення карбону приблизно на 15–20 %. Це може бути пов'язано зі збільшенням частки оксидів карбону та вторинних газоподібних продуктів унаслідок складнішого складу піролізного газу, присутності CO, H_2 та важких вуглеводнів. Водночас така поведінка є типовою для альтернативних палив із високою реакційною здатністю та не виключає можливості оптимізації процесу шляхом регулювання коефіцієнта надлишку повітря і часу перебування реагентів у зоні горіння.

Поле швидкостей та аеродинаміка газового потоку у реакторі за результатами моделювання представлено на рис. 3.3. Склад адаптованої паливної суміші (масові частки): H_2 – 0,30, CH_4 – 0,30 (включає еквівалент важких вуглеводнів), CO_2 – 0,15, CO – 0,10; SO_2 – 0,10 (еквівалентна заміна сірчистих сполук), N_2 – 0,05, H_2O – 0,0.

Представлені результати CFD-моделювання свідчать про суттєву зміну аеродинамічної та теплохімічної структури факела під час переходу від традиційного природного газу до піролізного газу відпрацьованих шин. Аналіз поля швидкостей показує формування інтенсивної зони рециркуляції

безпосередньо після палинкового пристрою, що є характерною ознакою стабільного факела та забезпечує ефективне перемішування продуктів горіння з окисником.



Рисунок 3.3 – Візуалізація поля швидкостей та аеродинаміка газового потоку у реакторі

На візуалізації швидкісного поля спостерігається локальна область високих швидкостей біля сопла подачі паливної суміші та формування декількох замкнених вихрових структур у початковій зоні реактора. Такі вихори виконують роль внутрішнього стабілізатора полум'я, повертаючи частину гарячих продуктів горіння до кореня факела. Внаслідок цього значно прискорюється займання паливної суміші та підвищується повнота конверсії горючих компонентів.

Особливістю досліджуваного піролізного газу є високий вміст водню (30 %) та метану (30 %), які характеризуються значною теплотою згорання та високою швидкістю реакцій окиснення. Саме цим пояснюється досягнення максимальних температур у ядрі факела на рівні 2462,9 K. Для реакторів виробництва технічного вуглецю такі температури є достатніми для швидкого термічного розкладання вуглеводневої сировини та інтенсифікації процесів зародження частинок технічного вуглецю.

Разом із тим отримане значення середньої температури на контрольному перерізі (990,6 K) свідчить про значне охолодження газового потоку вздовж

реактора. Це вказує на формування компактного високоінтенсивного факела з концентрацією основного тепловиділення в початковій зоні горіння. Подібна поведінка характерна для водневмісних палив, коли більша частина тепла виділяється на початкових стадіях процесу.

З точки зору технології виробництва технічного вуглецю така ситуація має як переваги, так і певні ризики.

До позитивних факторів належать швидке досягнення температур, необхідних для піролізу сировини; покращення стабільності факела; повне вигорання токсичного чадного газу; відсутність залишкового водню в продуктах реакції; підвищення енергетичної ефективності паливного процесу.

Водночас надмірно високі локальні температури можуть сприяти утворенню частинок технічного вуглецю з меншою середньою дисперсністю; посиленню процесів агрегації первинних частинок; локальному перегріву футерівки реактора; нерівномірному розподілу температурного поля по перерізу реактора.

Особливу увагу слід звернути на показники конверсії компонентів газової суміші. Практично повне зникнення водню та СО (залишкова масова частка близько 10^{-7}) свідчить про ефективне використання хімічної енергії палива та достатню кількість окисника в зоні горіння. Залишкова концентрація метану становить лише 0,0077, тобто менше 1 %, що також підтверджує майже повне завершення реакцій окиснення.

Важливим показником є нормалізований вуглецевий баланс 0,922. Для процесів виробництва технічного вуглецю це значення можна вважати досить високим. Воно свідчить про те, що значна частина вуглецю не переходить у газоподібні продукти повного окиснення, а потенційно може бути залучена до реакцій сажеутворення. Високий вміст метану, СО та інших вуглецевмісних компонентів піролізного газу створює сприятливі передумови для утворення прекурсорів технічного вуглецю — ацетилену, ароматичних та поліциклічних ароматичних сполук.

Аналіз швидкісного поля також показує, що після зони активного горіння потік переходить у відносно стабільний осьовий режим з помірними градієнтами швидкості. Для процесу формування технічного вуглецю це є позитивним фактором, оскільки забезпечує достатній час перебування частинок у високотемпературній зоні та сприяє розвитку механізмів поверхневого росту й агломерації.

З технологічної точки зору результати моделювання підтверджують можливість використання піролізного газу відпрацьованих шин як альтернативного палива в реакторі виробництва технічного вуглецю. Отримані температурні рівні забезпечують необхідні умови для термічного розкладання вуглеводневої сировини, а високий вуглецевий баланс створює потенціал для збереження або навіть збільшення виходу цільового продукту. Разом з тим для промислового впровадження доцільно провести додаткову оптимізацію співвідношення паливо – повітря та геометрії пальникового вузла з метою зниження пікових температур і формування більш протяжної зони сажеутворення, що дозволить ефективніше контролювати морфологію та дисперсність отриманого технічного вуглецю.

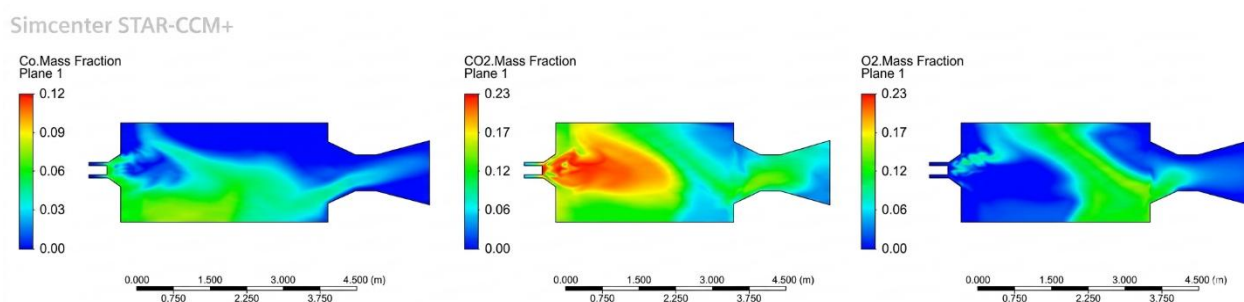


Рисунок 3.4 – Візуалізація поля швидкостей та аеродинаміка газового потоку у реакторі

На рис. 3.4 наведено розподіли масових часток CO, CO₂ та O₂ у горизонтальному реакторі виробництва технічного вуглецю при використанні піролізного газу, отриманого з відпрацьованих шин, як паливного компонента.

Аналіз полів концентрацій дозволяє простежити закономірності перебігу реакцій окиснення та оцінити ефективність організації процесу горіння в паливній зоні реактора.

З отриманих результатів видно, що максимальні концентрації СО локалізуються безпосередньо в зоні виходу паливного струменя та первинного змішування піролізного газу з окисником. Масова частка СО у цій області досягає значень близько 0,10–0,12, що відповідає початковому складу паливної суміші та є характерним для умов неповного окиснення вуглеводневих компонентів при високих температурах. У міру просування газового потоку вздовж реактора концентрація СО поступово знижується, що свідчить про його активне залучення до реакцій подальшого окиснення відповідно до реакції:



Зниження вмісту СО супроводжується одночасним збільшенням концентрації діоксиду вуглецю, що підтверджує виконання карбонового балансу системи та відображає завершення основних стадій горіння. Найвищі значення масової частки CO_2 спостерігаються в центральній частині факела та зоні найбільш інтенсивного тепловиділення. Саме тут відбувається максимальна швидкість окиснення як метану, так і проміжних продуктів горіння, включаючи водень та чадний газ. Підвищені концентрації CO_2 у зоні ядра факела узгоджуються з результатами температурного аналізу, який показав досягнення локального максимуму температури на рівні 2462,9 К. Таким чином, області підвищеного вмісту CO_2 можна розглядати як індикатори найбільш активного перебігу реакцій горіння.

Розподіл кисню (рис.3.4) демонструє протилежну закономірність. Максимальні концентрації O_2 локалізовані поблизу зон подачі вторинного повітря та периферійних ділянок реактора. Після контакту з паливним струменем спостерігається різке зменшення масової частки кисню, що свідчить про його інтенсивне споживання у реакціях окиснення. Найнижчі

концентрації O_2 формуються в центральній частині факела, де відбувається найбільш повне вигорання водню, метану та чадного газу. Такий характер розподілу підтверджує, що процес горіння контролюється насамперед швидкістю змішування компонентів, а не кінетичними обмеженнями реакцій.

Особливу увагу привертає асиметричний характер концентраційних полів, який добре узгоджується з аеродинамікою потоку в реакторі. Формування локальних зон рециркуляції поблизу пальникового пристрою забезпечує повернення гарячих продуктів згоряння до кореня факела, що сприяє стабілізації процесу запалювання та підтриманню високої температури в зоні реакції. Водночас інтенсивне турбулентне перемішування забезпечує швидке залучення кисню до реакційної зони та практично повну конверсію водню і чадного газу, що узгоджується з результатами матеріального балансу.

З точки зору технології виробництва технічного вуглецю отримані результати мають важливе практичне значення. Висока температура ядра факела забезпечує ефективний термічний розклад важких ароматичних компонентів сировини та утворення активних вуглецевих зародків. Одночасно наявність зон із пониженими концентраціями кисню після основної області горіння створює відновне середовище, необхідне для запобігання надмірному окисненню новоутворених частинок технічного вуглецю. Таким чином, спостережуваний розподіл CO , CO_2 та O_2 свідчить про формування сприятливих умов для поєднання двох ключових процесів: інтенсивного тепловиділення у паливній зоні та подальшого утворення вуглецевих частинок у реакційному об'ємі.

Загалом результати CFD-моделювання підтверджують, що використання піролізного газу відпрацьованих шин як альтернативного палива здатне забезпечити стійке високотемпературне горіння з практично повною конверсією відновлювальних компонентів (H_2 і CO), ефективним використанням кисню та формуванням теплового режиму, придатного для промислового синтезу технічного вуглецю. Спостережувані концентраційні поля CO , CO_2 та O_2 відповідають фундаментальним закономірностям

збереження маси, вуглецевого балансу та механізму послідовного окиснення вуглеводневого палива у реакторах пічного типу.

Наступним етапом дослідження було аналіз впливу часу перебування та температури на формування частинок технічного вуглецю з використанням в якості частини сировини піролізної оливи відпрацьованих шин (рис. 3.5).

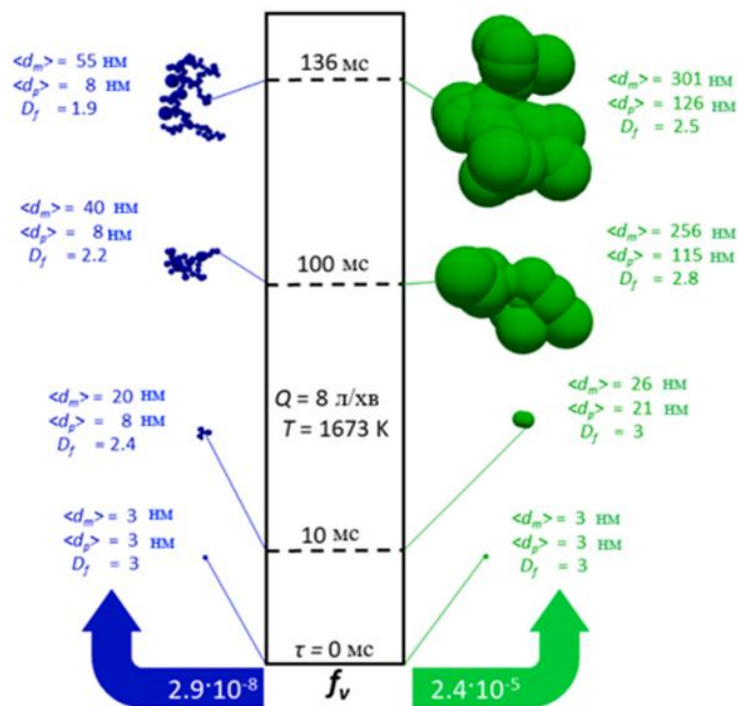


Рисунок 3.5 – Динаміка росту частинок технічного вуглецю з їх діаметром первинних частинок d_p , середнім діаметром d_m та фрактальній розмірності D_f на центральній лінії реактора з ламінарним потоком, отримані за допомогою Simcenter STAR-CCM+ агрегації та їх поверхневого росту, що призводять до концентрації вуглецевої фази f_v $2,9 \cdot 10^{-6}$ (сині) або $2,4 \cdot 10^{-6}$ (зелені).

За початкового моменту часу ($\tau = 0$ мс) у реакційному об'ємі формуються первинні зародки частинок технічного вуглецю діаметром близько 3 нм. На цій стадії відбувається інтенсивний термічний розклад ароматичних компонентів піролізної оливи з утворенням активних радикалів, ацетилену, бензену та поліциклічних ароматичних сполук. Температура 1673 К забезпечує достатню швидкість реакцій дегідрування та конденсації ароматичних структур, що сприяє швидкому зародженню вуглецевих частинок.

Через 10 мс перебування в реакторі спостерігається суттєве збільшення середнього діаметра агрегатів. За низької концентрації вуглецевої фази ($f_v =$

$2,9 \cdot 10^{-8}$) формуються компактні агрегати із середнім діаметром $d_m \approx 20$ нм та діаметром первинних частинок $d_p \approx 8$ нм за фрактальній розмірності $D_f = 2,4$. Це свідчить про домінування механізму поверхневого росту частинок за рахунок осадження ацетилену та легких ароматичних сполук на їх поверхні. В умовах використання піролізної оливи відпрацьованих шин такий механізм може бути ще більш вираженим через підвищений вміст ароматичних прекурсорів порівняно з чистим етиленом.

Зі збільшенні об'ємної частки технічного вуглецю до $f_v = 2,4 \cdot 10^{-5}$ уже на 10 мс утворюються значно більші агрегати з $d_m \approx 26$ нм та $d_p \approx 21$ нм. Зростання концентрації прекурсорів призводить до збільшення швидкості поверхневих реакцій і частоти зіткнень між частинками, що прискорює їх агломерацію.

Подальше збільшення часу перебування до 100 мс супроводжується істотною зміною морфології технічного вуглецю. Для високих концентрацій вуглецевої фази середній діаметр агрегатів досягає 256 нм, а діаметр первинних частинок – 115 нм за фрактальної розмірності $D_f = 2,8$. Це свідчить про інтенсивний поверхневий ріст і ущільнення структури агрегатів. У випадку піролізної оливи відпрацьованих шин даний ефект може посилюватися внаслідок безперервного утворення важких поліциклічних ароматичних вуглеводнів, які виступають додатковим джерелом вуглецю для росту частинок.

Максимальний час перебування 136 мс забезпечує завершення основних процесів формування морфології технічного вуглецю. Для умов підвищеної концентрації вуглецевої фази утворюються великі агрегати із середнім діаметром $d_m \approx 301$ нм та діаметром первинних частинок $d_p \approx 126$ нм. Фрактальна розмірність 2,5 вказує на формування достатньо компактної структури, характерної для промислових марок пічного технічного вуглецю. Такі розміри відповідають грубодисперсним маркам технічного вуглецю, які можуть бути використані як наповнювачі гумових композицій або як відновлений технічний вуглець після піролізної переробки шин.

Для низьких концентрацій вуглецевої фази за аналогічного часу перебування середній діаметр агрегатів становить лише 55 нм, тоді як діаметр первинних частинок залишається на рівні 8 нм. При цьому фрактальна розмірність зменшується до 1,9, що свідчить про формування більш розгалужених агломератів із меншою щільністю упаковки частинок. Такі структури характерні для високоактивних марок технічного вуглецю з розвиненою питомою поверхнею.

Отримані результати демонструють, що температура 1673 К створює сприятливі умови для швидкого утворення та росту частинок технічного вуглецю з продуктів термічного розкладання піролізної оливи відпрацьованих шин. Водночас визначальним фактором формування кінцевої морфології є час перебування частинок у високотемпературній зоні реактора. Зі збільшенням часу реакції від 10 до 136 мс відбувається перехід від стадії зародження до стадії поверхневого росту та агломерації, що супроводжується збільшенням середнього діаметра агрегатів більш ніж у 10 разів. Це підтверджує можливість цілеспрямованого керування дисперсністю та структурою технічного вуглецю шляхом регулювання температурного режиму та часу перебування продуктів піролізу в реакційній зоні, що є одним із ключових завдань під час проєктування реакторів та їх модернізації для одержання високоякісного відновленого технічного вуглецю з відпрацьованих шин.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Оцінка умов, в яких виконується дослідницька робота

Дослідницька робота проводилася у навчальній лабораторії, об'єктом дослідження був промисловий реактор. Тому в даному розділі розглянуті небезпечні фактори як робочого місця дослідника, так і безпосередньо виробничого цеху згідно з [28].

До небезпечних фізичних факторів відносяться:

- механізми, що рухаються (повітродувки, витяжки) – можуть спричинити механічні травми працюючим;
- утворення вибухонебезпечних концентрацій парів та газів (метану, водню), можливі вибухи з руйнуванням апаратів, пожежі;
- підвищена температура поверхні устаткування (корпус реактора), взаємодія людини з якими може викликати опіки шкіри різного ступеня;
- підвищений рівень шуму від газових пальників, що може викликати головний біль та зниження слуху;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі (як живлення ПК, так і промислових установок 380В/220В), можливі електричні травми;
- випромінювання від моніторів ПК та тривале статичне навантаження на зір під час комп'ютерного моделювання.

До хімічно небезпечних та шкідливих виробничих факторів на об'єкті дослідження відносимо речовини: чадний газ, діоксид сірки та пил технічного вуглецю. Характеристики токсичності речовин наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики токсичності речовин

Речовина	ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки
Окис вуглецю (CO)	20	IV
Діоксид сірки (SO ₂)	10	III
Технічний вуглець	4	III

Окис вуглецю (CO) – безбарвний газ без запаху. Надзвичайно токсичний, зв'язується з гемоглобіном крові, викликаючи кисневе голодування (гіпоксію). Симптоми отруєння: головний біль, нудота, запаморочення. При високих концентраціях викликає втрату свідомості та смерть.

Діоксид сірки (SO₂) – безбарвний газ із різким запахом. Сильно подразнює слизові оболонки очей та дихальних шляхів. Викликає кашель, задуху, при тривалому впливі призводить до хронічних захворювань легень.

Пил технічного вуглецю – високодисперсний вуглецевий пил. При вдиханні осідає в легенях, здатний викликати професійне захворювання – пневмоконіоз. Також подразнює шкіру та очі.

4.2 Оцінка стану об'єкту в надзвичайних ситуаціях

При експлуатації об'єкта дослідження використовується пожежовибухонебезпечна речовина – природний газ (основний компонент – метан, CH₄) та піролізний газ.

В табл. 4.2 зведено основні показники пожежо- та вибухонебезпеки.

Таблиця 4.2 – Основні показники пожежо- та вибухонебезпеки речовин

Речовина	Концентраційні межі вибуховості в повітрі: від	Температура самозапалювання, С
Метан (CH ₄)	5% до 17% об.	537
Водень (H ₂)	4% до 75% об.	560

Причинами пожеж та вибухів можуть бути:

- розгерметизація газопроводу та утворення горючого середовища;
- спалах електропроводки при короткому замкненні;
- порушення режиму розпалювання печі;
- статична електрика.

Розрахуємо надлишковий тиск вибуху в приміщенні цеху, в якому внаслідок аварії трубопроводу відбувся витік 1 м³ метану.

Реакція горіння метану: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Для визначення критеріїв вибухопожежної небезпеки слід розрахувати надлишковий тиск вибуху:

$$P_{\max} = P_0 \cdot (T_B / T_0) \cdot (y / x) \quad (4.1)$$

де y – кількість молей речовин після вибуху, 3;

P_0 – початковий тиск, 101 кПа;

T_B – температура вибуху, близько 1500 К;

T_0 – початкова температура, 293 К;

x – кількість молей речовин до вибуху, 3.

$$P_{\max} = 101 \cdot (1500 / 293) \cdot (3 / 3) = 517 \text{ кПа}$$

m – розрахункова маса метану, яка потрапила у повітря приміщення, кг:

$$m = V \cdot r, \quad (4.3)$$

де V – об'єм газу, 1 м³;

r – густина метану, 0,71 кг/м³.

$$m = 1 \cdot 0,71 = 0,71 \text{ кг}$$

Z – коефіцієнт участі горючої речовини у вибуху, для газів 0,5.

V_B – вільний об'єм приміщення, приймаємо 80% від геометричного;

$$V_B = 9 \cdot 6 \cdot 3,6 \cdot 0,8 = 155,52 \text{ м}^3$$

$C_{\text{ст}}$ – стехіометрична концентрація метану, об. %:

$$C_{\text{ст}} = 100 / (1 + 4,84 \cdot b) \quad (4.7)$$

де b – стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції горіння (2).

$$C_{\text{ст}} = 100 / (1 + 4,84 \cdot 2) = 9,36 \text{ об. \%}$$

K_H – коефіцієнт негерметичності, 3.

Розрахуємо надлишковий тиск вибуху (dP):

$$dP = (P_{\max} - P_0) \cdot (m \cdot Z \cdot 100) / (V_B \cdot r \cdot C_{\text{ст}} \cdot K_H)$$

$$dP = (517 - 101) \cdot (0,71 \cdot 0,5 \cdot 100) / (155,52 \cdot 0,71 \cdot 9,36 \cdot 3) = 4,75 \text{ кПа}$$

За таким надлишковим тиском вибуху його дія на людину безпечна (легкі пошкодження). Ступінь руйнування будівлі слабка.

Категорія приміщення – В (пожежонебезпечне приміщення). Клас зони П-І.

4.3 Заходи зі створення безпечних і здорових умов праці

В хімічній лабораторії встановлені правила зберігання, поводження і роботи з хімічним речовинами.

При роботі з реактивами необхідно працювати в гумових рукавичках, обов'язково під витяжкою та у добре провітрюваному приміщенні.

При роботі з леткими компонентами необхідно використовувати приточно-витяжну вентиляцію, працювати тільки в спецодязі, в захисних окулярах та рукавичках. При потрапленні на шкіру необхідно змити теплою водою з милом, промити декілька хвилин і обов'язково звернутися до лікаря.

Реактиви зберігались в закритому посуді з чіткими написами. Легкозаймисті рідини в лабораторії зберігаються в товстостінних банках з притертими кришками. Банки поміщають у металеву шухляду з кришкою, що щільно закривається, дно якої викладено азбестом, шухляду встановлюють подалі від нагрівальних приладів.

Лабораторні столи захищені керамічним покриттям, підлога покрита лінолеумом, стіни зафарбовані у світлі тони.

В лабораторії, у визначеному місці, повинна знаходитися спеціальна аптечка для надання першої допомоги;

З метою зменшення небезпеки ураження електричним струмом передбачається захисне заземлення усіх електроустановок. Заземлювачі розташовані у ґрунті. Опір розтікання струму одного електрода, Ом:

$$R_e = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[\left(\ln \frac{2l}{d} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{4t + l}{4t - l} \right) \right] \quad (4.4)$$

де ρ – питомий опір ґрунту у місці розташування заземлювачів, 700 Ом·м;

l – довжина трубчастого електрода, 2,8 м;

d – діаметр трубчастого електрода, 0,05 м;

t – глибина розташування середини електрода від поверхні землі, м;

$$t = t_0 + \frac{1}{2} \cdot l \quad (4.5)$$

де t_0 – відстань від верхньої точки заземлювача до поверхні землі, 1 м.

$$t = 1 + \frac{1}{2} \cdot 2,8 = 2,4 \text{ м}$$

$$R_e = \frac{700}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,8} \cdot \left[\left(\ln \frac{2 \cdot 2,8}{0,05} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,4 + 2,8}{4 \cdot 2,4 - 2,8} \right) \right] = 199,9 \text{ Ом}$$

Потім підраховують попередню кількість заземлювачів:

$$n' = \frac{R_e}{R_{\text{доп}}} \quad (4.6)$$

де $R_{\text{доп}}$ – допустимий опір заземлюючого пристрою: 4 Ом для установок з напругою живлення до 1000 В.

$$n' = \frac{199,9}{4} = 49,9$$

Прийmemo попередню кількість електродів – 50. Встановлюємо потрібну кількість вертикальних електродів:

$$n = \frac{n'}{\eta_e} \quad (4.7)$$

де η_e – коефіцієнт використання вертикальних електродів, який враховує обопільне екранування, 0,4 при $a=1$, тоді:

$$n = \frac{50}{0,4} = 125$$

Прийmemo остаточну кількість електродів – 125. Знаючи кількість заземлювачів, знаходять довжину з'єднувальної штаби L , м:

$$L = a \cdot n \cdot l \quad (4.8)$$

де a – значення відношення відстані між електродами до їх довжини, 1.

$$L = 1 \cdot 125 \cdot 2,8 = 350 \text{ м}$$

Опір розтіканню струму з'єднувальної штаби без урахування екранування, Ом:

$$R_{ш} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2 \cdot L^2}{b \cdot t_0} \quad (4.9)$$

де b – ширина з'єднувальної штаби, 0,05 м.

$$R_{ш} = \frac{700}{2 \cdot 3,14 \cdot 350} \cdot \ln \frac{2 \cdot 350^2}{0,05 \cdot 1} = 4,9 \text{ Ом}$$

Останнім визначають загальний опір заземлюючого пристрою R_z , який складається із опору вертикальних електродів та опору з'єднувальної штаби, Ом:

$$R_{zag} = \frac{R_e \cdot R_{ш}}{R_e \cdot \eta_{ш} + R_{ш} \cdot \eta_e \cdot n} \quad (4.10)$$

де $\eta_{ш}$ – коефіцієнт використання з'єднувальної штаби, 0,19.

$$R_{zag} = \frac{199,9 \cdot 4,9}{199,9 \cdot 0,19 + 4,9 \cdot 0,36 \cdot 125} = 3,79 \text{ Ом}$$

Отримане значення R_z порівнюють із $R_{доп.}$: $3,79 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$, розрахунок виконано згідно вимог [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Для поліпшення умов праці на робочих місцях передбачена вентиляція штучна витяжна та природна [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Розрахунок продуктивності місцевої вентиляційної установки виконується за формулою:

$$W = F \cdot v \cdot 3600 \quad (4.11)$$

де F – площа відкритої пройми шафи, 0,8 м²;

v – швидкість руху повітря у прорізі, при відведенні токсичних речовин III класу небезпеки (толуол) приймаємо 0,7 м/с.

$$W = 0,8 \cdot 0,7 \cdot 3600 = 2016 \text{ м}^3/\text{год}$$

Передбачено встановлення відцентрового вентилятора типу ВЦ 4–70 продуктивністю 2800 м³/год, номер вентилятору 4, напір 45 мм вод.ст., частота обертів 1500 об/хв, електродвигун типу 4А71В4 потужністю 0,75 кВт.

Для забезпечення нормальних зорових умов роботи передбачено освітлення лабораторії природне і штучне. Природне освітлення бокове через

віконні прорізи в зовнішніх стінах. Штучне освітлення використовується при недостатньому природному.

Необхідну кількість світильників визначаємо за формулою:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot k \cdot Z}{F \cdot n \cdot u} \quad (4.12)$$

де E – нормативна освітленість, для А-2 розряду зорових робіт, 400 лк;

S – площа приміщення, 54 м².

k – коефіцієнт запасу, 1,3;

Z – поправочний коефіцієнт світильника, 1,1;

F – світловий потік лампи, 4800 лм;

n – кількість ламп у світильнику, 2 шт.;

u – коефіцієнт використання освітлювальної установки, визначається з показника приміщення φ . Показник приміщення розраховується за формулою:

$$\varphi = \frac{A \cdot B}{H \cdot (A + B)} \quad (4.13)$$

де A – довжина приміщення, 9 м;

B – ширина приміщення, 6 м;

h – висота підвісу світильника над робочою поверхнею, 3,6 м.

Показник приміщення:

$$\varphi = \frac{9 \cdot 6}{3,6 \cdot (9 + 6)} = 1$$

При коефіцієнті відбиття стелі та стін $\rho_{стелі}=70\%$, $\rho_{стін}=50\%$ – стеля й стіни пофарбовані у світлий колір, тоді коефіцієнт $u = 43\%$.

Необхідна кількість світильників :

$$N = \frac{400 \cdot 54 \cdot 1,3 \cdot 1,1}{4800 \cdot 2 \cdot 0,43} = 7,48$$

Для забезпечення мінімальної нормативної освітленості приймаємо 8 світильників типу ЛСП 02В–1×65 з лампами ЛБ–65, розташовані в 2 світлових ряди, по 4 світильники в ряду.

У лабораторії є центральна опалювальна система із застосуванням водяного опалення (батареї).

У будинку головного корпусу університету є господарська-питна і протипожежна система водопостачання.

Передбачено систему каналізації згідно.

В лабораторії зливи кислот та лугів підлягають нейтралізації. Протягом дня відходи збираються в призначений для цього посуд, який має відповідний надпис та знаходиться у витяжній шафі на піддоні в спеціально відведеному для цього місці. Наприкінці робочого дня в присутності відповідального по лабораторії повинна відбуватись нейтралізація і розведення зливів водою. Якість нейтралізації перед зливом перевіряється індикаторним папером, значення рН при цьому повинно бути 6,5–8,5 при температурі 6–30°C.

При роботі з агресивними та отруйними речовинами, кислотами, лугами користуються халатами, захисними окулярами, гумовими рукавицями та фартухами.

При роботі із гідроксидом натрію необхідні наступні захисні засоби: хімічні брзко захисні окуляри, резинові печатки, для захисту тіла – хімічно стійкий одяг, пропитаний вінілом або прорезинений фартук.

4.4 Протипожежні заходи

В лабораторіях проводиться короткий інструктаж Зз пожежної безпеки згідно з профілем лабораторії.

При роботі з реактивами використовують попереджувальні засоби та засоби пожежогасіння, які мають бути в наявності на випадок можливого загоряння: хімічна піна, пісок, інертний газ, тонко розпилена вода, порошкові та газові вогнегасники, азбестова ковдра.

При розливі горючих, летких сполук його необхідно засипати піском. У випадку загоряння для гасіння використовувати вуглекислотні вогнегасники.

Столи для роботи з легкоспалахуючими рідинами, кислотами та вибухонебезпечними речовинами повинні бути покриті негорючим

матеріалом. Нагрівання легкоспалахуючих рідин на відкритому полум'ї забороняється. Нагрівання легкоспалахуючих рідин слід проводити на водяних, масляних, піщаних та повітряних банях.

В хімічній лабораторії реактиви слід зберігати в шафах, які зачиняються на замки, ключі від яких повинні знаходитись у викладачів або лаборантів. Легкоспалахуючі і горючі рідини дозволяється зберігати в загальній кількості не більше ніж 2 л в спеціальних металевих сейфах (ящиках), встановлених на певній відстані від нагрівальних приладів.

Всі роботи з легкоспалахуючими і горючими рідинами повинні проводитись у витяжній шафі з негорючих матеріалів при працюючій вентиляції, нагрівання легкозаймистих рідин проводиться у невеликих кількостях на гліцериновій, водяній банях; при цьому використання відкритого полум'я неприпустиме.

Електроосвітлення у витяжній шафі повинно бути виготовлено у вибухобезпечному виконанні, вмикачі і електророзетки слід розмішувати поза витяжною шафою на негорючій основі.

Реактиви та інші матеріали, сумісне зберігання яких може викликати акумуляцію тепла, утворення пожежонебезпечних концентрацій або бути імпульсом для самозагоряння, повинні зберігатись у відповідній упаковці у негорючих шафах.

Лабораторія знаходиться на четвертому поверсі чотирьохповерхової будівлі. У будинку є два евакуаційні виходи 1,2 м з аварійним освітленням і одна металева драбина.

В лабораторії встановлено 1 комплект первинних засобів пожежогасіння. В комплект входять вогнегасники вуглекислові ВВК–2 (або ВВК–5); ящик з піском і лопата; повсть, кошма або азбестове полотно.

Пожежне водопостачання здійснюється по пожежному водопроводу.

Для своєчасного оповіщення про пожежну небезпеку та виклик пожежної охорони, передбачена звукова сигналізація, вид зв'язку – телефон.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність проведення дослідження

До основних задач хімічної промисловості та енергетики відносять підвищення рентабельності виробництва за рахунок використання альтернативних та дешевших видів палива, а також вирішення екологічних проблем утилізації відходів. Одним із найперспективніших напрямків є використання піролізного газу, отриманого в результаті переробки зношених автомобільних шин.

Заміна традиційного природного газу на піролізний під час виробництва технічного вуглецю дозволяє суттєво знизити собівартість кінцевого продукту. Однак, впровадження такого палива вимагає детального вивчення теплофізичних та аеродинамічних процесів, що відбуваються у топковій камері.

5.2 Організація дослідження та її оптимізація на засадах мережевої моделі

Для ефективного планування та координації виконання дослідницьких робіт у межах магістерського дослідження було використано метод мережевого планування. Застосування мережевого графіка дозволяє систематизувати послідовність виконання окремих етапів дослідження, визначити взаємозв'язки між ними, а також оптимізувати використання часу та наявних ресурсів. Такий підхід сприяє своєчасному виконанню поставлених завдань, підвищує керованість дослідницького процесу та забезпечує контроль за дотриманням календарного плану роботи [29, 30].

Використання мережевого графіка дає можливість своєчасно виявляти критичні етапи дослідження, контролювати виконання взаємопов'язаних робіт і приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо коригування графіка у разі необхідності. Крім того, мережеве планування забезпечує узгодженість

дій усіх учасників дослідження, що сприяє більш раціональній організації наукової роботи та скороченню термінів її виконання.

Перелік основних етапів і робіт, передбачених програмою дослідження, наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – План виконання науково-дослідницької роботи

№	Шифр	Перелік робіт	Виконавець	Тривалість, дні
1	2	3	4	5
1	0-1	Огляд літератури	Керівник, здобувач	10
2	1-2	Складання плану дослідження	Керівник, здобувач	3
3	2-3	Створення геометрії та сітки	здобувач	8
4	3-4	Налаштування фізики STAR-CCM+	здобувач	5
5	4-5	Завдання умов для природного газу	здобувач	3
6	4-6	Задання умов для пірол. газу	здобувач	6
7	5-7	Моделювання прир. газу	здобувач	10
8	6-7	Моделювання пірол. газу	здобувач	8
9	7-8	Оформлення літ. огляду	здобувач	15
10	7-8	Аналіз результатів	здобувач	7
11	8-9	Виконання розділу «Охорона праці»	здобувач	7
12	8-10	Економічна частина	здобувач	7
13	10-11	Оформлення дипломної роботи, підготовка доповіді та презентації	здобувач, керівник	10

На основі перелічених робіт будуємо мережевий графік (рис. 5.1). Побудова графіку пов'язана поняттями – подія та робота. Робота – це різноманітний процес, дія якого приводиться до досягнення певного результату. Подія – це початок будь-якої роботи і разом з цим підсумок іншої роботи. На графіку визначаємо критичний шлях – це шлях, який має максимальну тривалість.

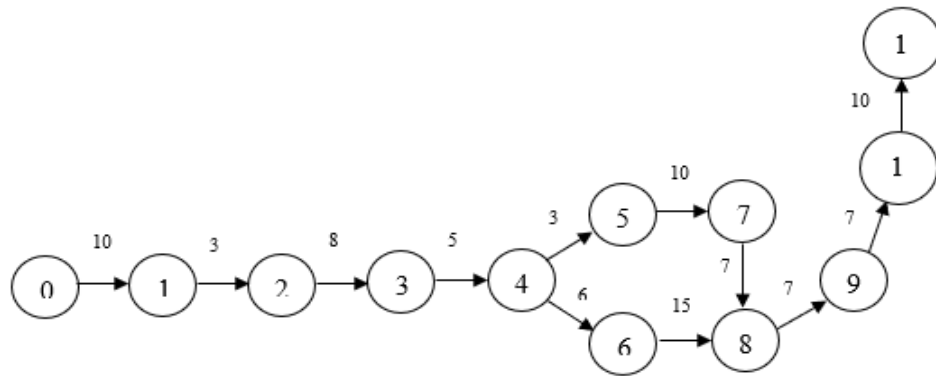


Рисунок 5.1 – Мережевий графік дипломної роботи

Тривалість критичного шляху мережевого графіка дорівнює:

$$\alpha_{\text{кр}} = 10+3+8+5+6+15+7+7+10 = 71 \text{ день}$$

Визначаємо параметри мережевого графіку:

t_{ij} – тривалість події;

t_i^r – ранній строк здійснення i -ої події.

Визначається довжиною критичного шляху від початкової до i -ої події; враховує, що початкова подія здійснюється в нульовий момент часу.

t_{ij}^{pn} – характеризується довжиною критичного шляху від початкової події до моменту початку даної роботи:

$$t_{ij}^{pn} = T_i^p \quad (5.1)$$

Це означає, що ранній строк здійснення i -ої події дорівнює ранньому строку початку роботи ij .

t_{ij}^{p3} – раннє закінчення.

Ранній строк закінчення роботи визначається довжиною критичного шляху від початкової події до моменту закінчення роботи:

$$t_{ij}^{p3} = t_{ij}^{pn} + t_{ij} \quad (5.2)$$

t_{ij}^{nn} – пізній строк початку роботи.

Це такий строк, який не викличе затримку здійснення кінцевої події, або зриву загальних строків виконання роботи. Розрахунок проводиться за формулою:

$$t_{ij}^{nn} = T_i^{n3} - t_{ij} \quad (5.3)$$

– пізнє закінчення здійснення роботи

$$t_{ij}^{n3} = T_i^{nn} \quad (5.4)$$

Це найбільш пізній допустимий момент закінчення роботи.

R_i – резерв часу, що являє собою різницю між T_i^n і T_i^p . Розрізняють резерв часу повний і вільний.

R_{ij}^n – повний резерв часу роботи, який показує на скільки можливо збільшити тривалість роботи, щоб при цьому максимальний повний шлях, який проходить через неї не перевищував довжини критичного шляху.

$$R_{ij}^n = T_i^n - T_i^p - t_{ij} \quad (5.5)$$

R_{ij}^e – вільний резерв часу роботи.

Показує ту частину повного резерву, яка може бути використана тільки для даної роботи не змінюючи при цьому ранніх строків послідуєчих робіт:

$$R_{ij}^e = T_j^p - T_i^p - t_{ij} \quad (5.6)$$

Розрахунок параметрів мережевого графіку в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок параметрів мережевого графіку

Шифр i-j	t_{ij}	Ранні строки		Пізні строки		Резерви часу	
		t_{ij}^{pn}	t_{ij}^{p3}	t_{ij}^{m}	t_{ij}^{n3}	R_{ij}^e	R_{ij}^n
0-1	10	0	10	0	10	0	0
1-2	3	10	13	10	13	0	0
2-3	8	13	21	13	21	0	0
3-4	5	21	26	21	26	0	0
4-5	3	26	29	27	30	0	1
4-6	6	26	32	26	32	0	0
5-7	10	29	39	30	40	0	1
6-7	8	32	40	32	40	0	0
6-8	15	32	47	32	47	0	0
7-8	7	40	47	40	47	0	0
8-9	7	47	54	47	54	0	0
9-10	7	54	61	54	61	0	0
10-11	10	61	71	61	71	0	0

5.3 Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження

Витрати на основні матеріали:

$$M = m_i \cdot \Pi_i \quad (5.7)$$

де M – витрати на i -й матеріал, грн.;

m_i – кількість витраченого i -го матеріалу, натуральні одиниці;

Π_i – ціна одиниці i -го матеріалу, грн./натуральні одиниці.

Таблиця 5.3 – Витрати на основні і допоміжні матеріали

№	Найменування залучених ресурсів	Одиниця виміру	Витрати в обсязі	Ціна за одиницю, грн	Сума витрат, грн
1	Папір офісний А4	пачка	1	250,00	250,00
2	Папки, канцелярське приладдя	набір	1	150,00	150,00
3	Флеш-накопичувач USB	шт.	1	200,00	200,00
	Усього витрат:				600,00

Витрати на електроенергію визначаються за формулою:

$$E = M \cdot K \cdot T \cdot a \quad (5.8)$$

де M – потужність електрообладнання, кВт;

K – коефіцієнт використання, приймаємо $K=0,9$;

T – тривалість проведення роботи на даному обладнанні, год.;

a – діючий тариф на 1кВт/год. електроенергії складає тариф 4,32 грн/кВт.

Розраховані дані знаходяться в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Витрати на електроенергію

№	Обладнання	Потужність, кВт	Коеф. (K)	Час (T), годин	Сума, грн
1	Персональний комп'ютер	0,5	0,9	300	583,20
2	Монітор	0,05	0,9	300	58,32
	Електрична плитка	1,2	0,9	10	46,66
	Шафа сушильна	2	0,9	10	77,76
	Шафа витяжна	1,5	0,9	40	233,28
	Ваги	0,0055	0,9	20	0,19
	Разом:				999,41

Витрати на амортизацію основних виробничих фондів, що використовуються в процесі проведення досліджень розраховуються за формулою:

$$A = \frac{\Phi * H * T}{100 * 12}, \quad (5.9)$$

де Φ – вартість основних виробничих фондів, грн.;

H – норма амортизації, %;

T – тривалість процесу дослідження на даному обладнанні, міс.

Витрати на амортизацію основних виробничих фондів, що використовуються в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Розрахунок витрат на амортизацію

№	Устаткування	Вартість, грн	Річна норма, %	Час, міс	Сума, грн
1	Персональний комп'ютер та монітор	30000	20	1	500,00
2	Монітор Samsung Odyssey G5	7899	20	1	1579,8
3	Електрична плитка	830	20	1	13,83
4	Шафа сушильна	5300	20	1	88,33
5	Шафа витяжна	6900	20	1	115
6	Ваги	300	20	1	5
	Разом:				2301,96

Витрати на заробітну плату виконавців дослідження визначається множенням середньочасового заробітку на кількість витраченого часу на виконання даної роботи. Розрахунки наводяться в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Розрахунок витрат на заробітну плату

№	Професія	Заробітна плата, грн/міс	Годинна ставка, грн/год	Кількість годин	Сума, грн
1	Керівник	16 000	95,24	70	6666,80
2	Здобувач	2 000	11,90	426	5069,40
	Разом:				11736,20

Відповідно до діючого законодавства слід зробити нарахування на ЗП, включити їх до кошторису витрат.

$$H_{\text{зп}} = \frac{11736,20 \cdot 22}{100} = 2581,96 \text{ грн}$$

Накладні витрати (H_v) включають різні витрати, які пов'язані з обслуговуванням установки (ремонт, освітлення, опалення приміщення). Їх приймають у відсотках від заробітної плати виконувачів дослідної роботи. Величину цього відсотка (β) приймають у розмірі до 80% розрахункової заробітної платні виконувачів:

$$H_v = \text{ЗП} \cdot \beta \quad (5.10)$$

$$H_{\text{зп}} = \frac{11736,20 \cdot 80}{100} = 9388,96 \text{ грн}$$

На основі розрахованих даних можна розрахувати загальну кількість витрат, необхідних для проведення дослідження. Кошторис витрат на проведення дослідницької роботи приведено в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Кошторис витрат на проведення дослідження

Витрати	Сума, грн	Відсоток до підсумку %
Основні матеріали	600,00	2,17
Енергетичні витрати	999,41	3,62
Заробітна платня	11736,20	42,51
Нарахування на заробітну плату	2581,96	9,35
Амортизація устаткування	2301,96	8,34
Накладні витрати	9388,96	34,01
Всього витрат (С)	27608,49	100

Дана магістерська робота відноситься до групи пошукових робіт. Тому ціну дослідження розраховуємо на основі витрат на дослідження і нормативної рентабельності за формулою:

$$\Pi = C + \frac{R \cdot C}{100}, \quad (5.11)$$

де Π – ціна дослідження, грн.;

C – витрати на дослідження, грн.;

R – нормативна рентабельність, %. Приймаємо $R=30\%$.

$$\Pi = 27608,49 + \frac{30 \cdot 27608,49}{100} = 35\,891,04 \text{ грн}$$

Розраховуємо ефективність дослідницької роботи, як співвідношення ціни та витрат за формулою:

$$E = \frac{(\Pi - C)}{C} \cdot 100\%$$

$$E = \frac{35\,891,04 - 27608,49}{27608,49} \cdot 100 = 30\%$$

5.4 Економічне обґрунтування практичного використання наукового дослідження

Практична цінність проведеного дослідження полягає у використанні сучасних методів комп'ютерного моделювання для аналізу процесів горіння та утворення технічного вуглецю в реакторі пічного типу. Застосування програмного комплексу Simcenter STAR-CCM+ дозволило здійснити віртуальне відтворення фізико-хімічних процесів, що відбуваються в реакторі, без необхідності проведення великої кількості експериментальних випробувань.

Використання CFD-моделювання забезпечило можливість прогнозування аеродинамічних характеристик потоку, температурних полів, процесів змішування реагентів, особливостей горіння паливної суміші та формування частинок технічного вуглецю. За допомогою чисельного моделювання було виконано підбір раціональних технологічних параметрів процесу, оцінено вплив режимних факторів на ефективність роботи реактора та проведено перевірку працездатності існуючої конструкції обладнання.

Економічний ефект від застосування комп'ютерного моделювання полягає у значному скороченні витрат на виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні витрати на проведення розрахунків та обробку результатів дослідження становили 35891,04 грн. Для отримання аналогічного обсягу інформації традиційними експериментальними методами необхідно було б виконати серію лабораторних та напівпромислових випробувань. Для цього необхідним було виготовлення або модернізації дослідної установки, витрат палива, сировини, енергоносіїв, залучення обслуговуючого персоналу та проведення численних вимірювань. За сучасних умов вартість таких досліджень може становити від кількох сотень тисяч до кількох мільйонів гривень залежно від масштабу експериментів.

Застосування CFD-моделювання дозволило відмовитися від значної частини натурних випробувань на початкових етапах дослідження, скоротити терміни розроблення технологічних рішень, мінімізувати витрати матеріальних ресурсів та знизити ризики, пов'язані з експлуатацією високотемпературного обладнання. Крім того, чисельне моделювання надало можливість оперативно аналізувати велику кількість варіантів конструктивних та технологічних рішень без додаткових фінансових витрат на виготовлення дослідних зразків.

Практичне використання результатів дослідження підтверджує високу економічну доцільність застосування CFD-моделювання для розроблення та оптимізації технологій одержання технічного вуглецю. Отримані результати можуть бути використані підприємствами для попереднього проєктування реакторів, оптимізації режимів роботи існуючого обладнання та зменшення витрат на проведення експериментальних досліджень, що забезпечує суттєвий економічний ефект та підвищує конкурентоспроможність технології.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз науково-технічної літератури щодо сучасних технологій виробництва технічного вуглецю та напрямів використання продуктів піролізу відпрацьованих шин. Показано перспективність залучення шинної піролізної оливи та піролізного газу як альтернативних джерел вуглецевмісної сировини для підприємств галузі.

2. Виконано дослідження фізико-хімічних характеристик шинної піролізної оливи та показників якості технічного вуглецю із використанням сучасних стандартизованих методів визначення густини, в'язкості, питомої поверхні, структурності та адсорбційних властивостей продукту.

3. На виробничих потужностях Кременчуцького заводу технічного вуглецю проведено промислові випробування сировинних композицій із вмістом шинної піролізної оливи 5 та 10 мас. %. Встановлено, що введення піролізної оливи у зазначених концентраціях не призводить до погіршення основних показників якості технічного вуглецю марки N660 та забезпечує збереження необхідного рівня структурності, дисперсності та поверхневої активності продукту.

4. Розроблено CFD-модель реактора виробництва технічного вуглецю у програмному комплексі Simcenter STAR-CCM+. Моделювання виконано в осесиметричній постановці із використанням розрахункової сітки, що містила 20 716 контрольних об'ємів, базовим розміром комірки 0,03 м та максимальною кількістю 7000 ітерацій для досягнення збіжності рішення.

5. У результаті чисельного моделювання досліджено температурні поля, швидкісні характеристики, структуру течії, розподіл концентрацій компонентів, теплове навантаження на внутрішні поверхні реактора, стабільність факела горіння та баланс карбону під час спалювання природного газу і газу піролізу відпрацьованих шин.

6. Встановлено, що використання піролізного газу як альтернативного палива дозволяє забезпечити стабільний режим роботи реактора та

формування температурних полів, необхідних для процесу утворення технічного вуглецю. Отримані результати підтверджують технічну можливість часткового заміщення традиційного природного газу продуктами піролізу шин.

7. Показано, що застосування цифрового моделювання дає можливість прогнозувати вплив температури, співвідношення «паливо–повітря», витрати сировини та часу перебування продуктів у реакторі на характеристики технічного вуглецю без проведення численних дороговартісних промислових експериментів.

8. Розраховано економічну ефективність використання CFD-моделювання. Загальна вартість виконання дослідження становила 27608,49 грн, що є суттєво нижчим показником порівняно з проведенням серії натурних випробувань у промислових умовах. Застосування програмного комплексу Simcenter STAR-CCM+ дозволило скоротити витрати на дослідження та прискорити процес вибору оптимальних технологічних параметрів.

9. Отримані результати свідчать про перспективність використання продуктів піролізу відпрацьованих шин у виробництві технічного вуглецю та підтверджують можливість їх практичного впровадження для розширення сировинної бази галузі, зменшення споживання традиційних нафтових ресурсів і реалізації принципів циркулярної економіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

-
- 1 Marius Ciobanu, Ana-Maria Lepadatu, Simona Asaftei Chemical and Electrochemical Studies of Carbon Black Surface by Treatment with Ozone and Nitrogen Oxide, 2016. Vol. 3, Supplement 2. P. S252 – S257. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.02.042>
 - 2 Chiemeka Onyeka Okoye, Isabelle Jones, Mingming Zhu, Zhezi Zhang, Dongke Zhang Manufacturing of carbon black from spent tyre pyrolysis oil – A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2021. Vol. 279. 123336 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123336>
 - 3 E.B. Sebok, R.L. Taylor Carbon Blacks *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 2001. P. 902 – 906. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00173-X>
 - 4 Chiemeka Onyeka Okoye, Mingming Zhu, Isabelle Jones, Juan Zhang Preparation and Characterisation of Carbon Black (CB) Using Heavy Residue Fraction of Spent Tyre Pyrolysis Oil, 2021. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(6):106561. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106561>
 - 5 Okoye, C. O., Jones, I., Zhu, M., Zhang, Z., & Zhang, D. Manufacturing of carbon black from spent tyre pyrolysis oil – A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2021. Vol. 279. 123336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123336>
 - 6 Yiran Fan, Geoff D. Fowler, Ming Zhao The past, present and future of carbon black as a rubber reinforcing filler – A review. *Journal of Cleaner Production*, 2020. Vol. 247. 119115 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119115>
 - 7 Andooz A., Eqbalpour M., Kowsari E., Ramakrishna S., Cheshmeh Z. A. A comprehensive review on pyrolysis from the circular economy point of view and its environmental and social effects. *Journal of Cleaner Production*, 2023. Vol. 388. 136021 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136021>.

-
- 8 Uğuz, G., & Ayanoğlu, A. Chemical characterization of waste tire pyrolysis products. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 20215(2), 163-170. <https://doi.org/10.35860/iarej.856112>
- 9 Martínez, J.; Puy, N.; Murillo, R.; Garcia, T.; Navarro, M.; Mastral, A. Waste tyre pyrolysis – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2013. 23. 179 – 213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>
- 10 Arabiourrutia, M.; Lopez, G.; Artetxe, M.; Alvarez, J.; Bilbao, J.; Olazar, M. Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2020, 129, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109932>
- 11 Quek, A.; Balasubramanian, R. Mathematical modeling of rubber tire pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2012, 95, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.01.012>
- 12 Xu, J.; Yu, J.; Xu, J.; Sun, C.; He, W.; Huang, J.; Li, G. High-value utilization of waste tires: A review with focus on modified carbon black from pyrolysis. *Sci. Total Environ*. 2020, 742, 140235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140235>
- 13 Arabiourrutia, M.; Lopez, G.; Artetxe, M.; Alvarez, J.; Bilbao, J.; Olazar, M. Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis –A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2020. 129. 109932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109932>
- 14 Pyshyev, S., Lypko, Y., Demchuk, Y., Kukhar, O., Korchak, B., Pochapska, I., & Zhytnetskyi, I. (2024). Characteristics and Applications of Waste Tire Pyrolysis Products: A Review. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(2), 244-256. <https://doi.org/10.23939/chcht18.02.244>
- 15 Niezgoda, A.; Deng, Y.; Sabatier, F.; Ansart, R. From end-of-life tires to storable energy carriers. *J. Environ. Manag.*, 2020. 276. 111318. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111318>
- 16 Quek, A.; Balasubramanian, R. Mathematical modeling of rubber tire pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2012, 95, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.01.012>
- 17 Nisar, J.; Ali, G.; Ullah, N.; Awan, I.A.; Iqbal, M.; Shah, A.; Sirajuddin; Sayed, M.; Mahmood, T.; Khan, M.S. Pyrolysis of waste tire rubber: Influence of

-
- temperature on pyrolysates yield. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018. 6. 3469–3473. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.021>
- 18 Martínez, J.; Puy, N.; Murillo, R.; Garcia, T.; Navarro, M.; Mastral, A. Waste tyre pyrolysis—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2013. 23. 179 – 213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>
- Li, D.; Lei, S.; Lin, F.; Zhong, L.; Ma, W.; Chen, G. Study of scrap tires pyrolysis—Products distribution and mechanism. *Energy*, 2020. 213. 119038.
- 19 Antoniou, N., & Zabaniotou, A. Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. Vol. 20. P. 539–558 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.005>
- 20 Li, D.; Lei, S.; Lin, F.; Zhong, L.; Ma, W.; Chen, G. Study of scrap tires pyrolysis—Products distribution and mechanism. *Energy*, 2020. 213. 119038.
- 21 Sarkar, M.D.; Mukunda, P.G.; De, P.P.; Bhowmick, A.K. Degradation of Hydrogenated Styrene–Butadiene Rubber at High Temperature, 1997. 70. P. 855–870. <https://doi.org/10.5254/1.3538465>
- 22 Wu, X.; Formela, K.; Rasool, R.t.; Wang, S. Evaluation of structural change during fast transformation process of cross-linked NR into liquid NR by light pyrolysis. *Polymer Degradation and Stability*, 2017. 136. P. 48–57.
- 23 Han, W., Han, D., & Chen, H. (2023). Pyrolysis of Waste Tires: A Review. *Polymers*, 15(7), 1604. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071604>
- 24 Nadimpalli, N. K. V., Buddhiraju, V., & Runkana, V. Modeling and simulation of carbon black synthesis in an aerosol flame reactor. *Advanced Powder Technology*, 2011. Vol. 22, Issue 1. P. 141-149 <https://doi.org/10.1016/j.appt.2010.12.015>
- 25 Fernandez H. R., Dasappa S., Sabado K. D., Camacho J. Production of Carbon Black in Turbulent Spray Flames of Coal Tar Distillates. *Applied Sciences*, 2021. 11(21). 10001. <https://doi.org/10.3390/app112110001>.
- 26 Bastiani F.H., Neto P.B., Buss L., Fritsching U. Noriler D. Modeling the Carbon Black Production in Enclosed

-
- FSP Reactor. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 2022. Vol. 9. P. 58 – 65. <https://doi.org/10.11159/jffhmt.2022.008>
- 27 Silva J.P., Teixeira S., Teixeira J.C. Development of a CFD Model to Study the Fundamental Phenomena Associated with Biomass Combustion in a Grate-Fired Boiler. *Processe*, 2025. 13(8). 2617. <https://doi.org/10.3390/pr13082617>
- 28 Полетаєв В.П., О. А. Крюковська, Охорона праці в галузі: навчальний посібник під ред. д.т.н., проф. А. П. Огурцова. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015. 363 с.
- 29 Економіка підприємства: Підручник. За ред. С.Ф. Покропивного. 3-є вид., перероб. та доп. К.: КНЕУ, 2006. 526 с.
- 30 Шваб Л.І. Економіка підприємства: Навчальний посібник. К.: Каравела, 2004. 568 с.

ДОДАТКИ



Міністерство освіти і науки України
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»
Український державний університет науки і технологій
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»



1930

СЕРТИФІКАТ УЧАСНИКА

підтверджує, що

Владислав ХОЛКІН

взяв(ла) участь в роботі
XII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції
здобувачів вищої освіти та молодих учених
«ХІМІЯ І СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ»
Загальна кількість академічних годин: 12 год. (0,4 кредиту ECTS)

член-кореспондент НАНУ
д.т.н., професор,
ректор УДУНТ



Костянтин СУХИЙ

д.х.н., професор,
директор ННІ УДХТУ



Ольга СВЕРДЛІКОВСЬКА

СЕРТИФІКАТ УЧАСНИКА ХІМІЯ І СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ

м. Дніпро
20-22 травня 2026