

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

**П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Обґрунтування технології переробки рослинної сировини  
в паливний газ»**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МГАІ-23  
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

\_\_\_\_\_Дорощук Ярослав Володимирович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Золотовська Олена Володимирівна

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: "Магістр"

208 "Агроінженерія"

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

тракторів і СГМ

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Дорощук Ярослав Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи :** Обґрунтування технології переробки рослинної сировини в паливний газ

керівник роботи к.т.н., доцент Золотовська Олена Володимирівна

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“12” 11 2024 року №3784

2. **Строк подання студентом роботи** 27.11.2024 р

3. **Вихідні дані до роботи** Аналіз технологій термічної обробки рослинної біомаси, огляд джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Аналіз сучасного стану процесу термічної переробки. 2. Теоретичне обґрунтування удосконаленої технології. 3. Обґрунтування експериментальних досліджень. 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Економічна ефективність використання паливного газу. Висновок. Бібліографічний список.

## 5 Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і предмет досліджень. (2 аркуш, А4).
2. Огляд і аналіз конструкцій (1 аркуші, А4).
3. Теоретичні дослідження (2 аркуші, А4).
4. Експериментальні дослідження (3 аркуші А4)
5. Економічна частина. (1 аркуш А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Золотовська О.В., доцент		
2	Золотовська О.В., доцент		
3	Золотовська О.В., доцент		
4	Золотовська О.В., доцент		
5	Золотовська О.В., доцент		
Нормо-контроль	Теслюк Г.В., завідувач кафедри		

7. Дата видачі завдання 19.02.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз технічних рішень	до 28.05.24 р	
2.	Виконання теоретичних досліджень	до 30. 06.24 р	
3	Виконання експериментальних досліджень	до 6.09.24 р.	
4	Охорона праці	до 07.11.24 р.	
5	Економічна частина	до 11.11.24 р.	
6.	Демонстраційний матеріал	до 24.11.24 р.	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Дорошук Я.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Золотовська О.В.  
(прізвище та ініціали)

<i>n/n</i>	<i>Формат</i>	<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кількість стор.</i>	<i>Номер аркуша</i>			<i>Примітка</i>		
			<u>Текстові документи</u>							
1	A4	52ДР044.000.000ПЗ	Пояснювальна записка	72						
			<u>Демонстраційні</u>							
2	A4		Мета і задачі	2	1,2					
3	A4		Огляд і аналіз	1	3					
4	A4		Теоретичні дослідження	2	4,5					
5	A4		Експериментальні дослідження	3	6,7,8					
6	A4		Економічна частина	1	9					
7	A4		Висновки	1	10					
					52.ДР044.000.000ПЗ					
3	Арк.	№ докум.	Під	Дата						
Розробив	Дорощук Я.В				Відомість дипломної роботи			літ	арк	арк
Перевірив	Золотовська О.В								4	72
Т. контр								МІАІ-23 ДДАЕУ		
Н. контр	Теслюк Г.В.									
Затверд.	Теслюк Г.В.									

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ	9
1.1 Термічна переробка рослинної сировини	9
1.2 Технологія швидкого піролізу	11
1.3 Піроліз в киплячому шарі	13
1.4 Піроліз у циркулюючому псевдозрідженому шарі	14
1.5 Абляційний піроліз	16
1.6 Камери піролізу зі шнеком	18
1.7 Циклонні камери піролізу	20
1.8 Вакуумний піроліз у рухомому шарі	21
1.9 Удосконалення технології отримання біопалива	26
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	30
2.1 Модель процесу газифікації продуктів піролізу	30
2.2 Обґрунтування математичної моделі газифікації	33
3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	43
3.1 Аналіз результатів досліджень	45
3.1.1 Результати процесу теплопровідного піролізу	45
3.1.2 Результати процесу газифікації продуктів піролізу	47
3.2 Визначення складу та теплотворної здатності паливного газу	51
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	58
4.1 Організація охорони праці на підприємствах	58
4.2. Вимоги безпеки праці під час виконання робіт на опалювальних газових установках	59
4.2.1. Загальні положення	59
4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком робіт	60
4.2.3 Вимоги безпеки праці під час виконання робіт	60
4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях	61
4.2.5 Вимоги безпеки праці після завершення робіт	62
5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗУ	64
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

## АНОТАЦІЯ

Дорощук Я.В. Обґрунтування технології переробки рослинної сировини в паливний газ/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

В дипломній роботі проаналізовано конструкції установок з переробки рослинної сировини в паливний газ. Визначені перспективне використання запропонованих та порівняльний аналіз існуючих конструкцій. Виконані аналітичні дослідження закономірності отримання багатокалорійного газу в установці, які враховують взаємозв'язки геометричних та енергетичних параметрів установки. Визначено характер впливу властивостей біомаси та технологічних параметрів процесу теплопровідного піролізу на паливні властивості отриманого газу. Розроблена математична модель сукупності процесів газифікації продуктів піролізу деревини. Розроблена схема термічної переробки біомаси з утворенням паливного газу та його збагаченням. Проведена економічна оцінка установки.

Ключові слова: біопаливо, піроліз, біомаса, енергетичні характеристики, газифікація.

Публікація статті в збірнику тез «ІІІ Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» 15 листопада 2024 року «МОДЕЛЬ ПІДВИЩЕННЯ КАЛОРІЙНОСТІ ПІРОЛІЗНОГО ГАЗУ». Ч.1.

## Вступ

Оскільки світові запаси нафти і газу продовжують скорочуватися, перехід на відновлювані джерела є одним з найактуальніших економічних і промислових викликів. Рослинна біомаса є перспективною та екологічно безпечною альтернативою відновлюваної енергетики. Водночас, основним викликом для сільського господарства є повна та раціональна утилізація відходів деревообробки. Ці відходи рідко утилізуються, але можуть бути успішно використані як сировина для термохімічних процесів. Одним з перспективних методів переробки рослинної біомаси в процесах термохімічної конверсії є швидкий термічний піроліз. Цей метод піролізу особливо підходить для маломасштабного виробництва завдяки низьким інвестиційним витратам і високій енергоефективності порівняно з іншими процесами перетворення. У процесі піролізу деревних відходів основним продуктом є піролізна рідина (піропаливо), яка має значні переваги перед твердою біомасою, такі як вища енергетична щільність, стабільніший склад при зберіганні та легкість у використанні і транспортуванні. Піропаливо, вироблене за технологією швидкого термічного піролізу, придатне для прямого спалювання в котлах і є альтернативою невідновлюваним видам палива. Однак якість піропалива може бути недостатньою для комерційного використання (переважно двигуни внутрішнього згоряння та газові турбіни). Тому першочерговими завданнями є технологія газифікації піропалива, яка дозволяє отримувати генераторні гази з високою теплотворною здатністю для використання у виробництві електричної енергії та хімічних продуктів. Таким чином, розроблена комбінована технологія дозволяє переробляти рослинні відходи в піропаливо в місці їх виникнення, агрегувати та транспортувати до централізованого пункту збору для подальшого використання з метою отримання цінних хімічних продуктів та електричної енергії.

На сьогоднішній день питання газифікації рідких піропалив для отримання висококалорійних газів та швидкого теплопровідного піролізу рослинної біомаси з отриманням рідких продуктів з високою енергетичною

щільністю вивчені недостатньо і потребують подальших досліджень і розробок.

Мета роботи – обґрунтування процесу переробки деревинної біомаси з подальшої газифікацією з підвищенням його теплотворної здатності

Предмет дослідження – закономірності отримання багатокалорійного газу

Об'єкт дослідження – пристрій газифікації

Задачі кваліфікаційної роботи:

1. Провести аналіз технологій в області термічної переробки рослинної біомаси
2. Визначити характер впливу властивостей біомаси та технологічних параметрів процесу теплопровідного піролізу на паливні властивості отриманого газу.
3. Розробити математичну модель сукупності процесів газифікації продуктів піролізу деревини
4. Провести обґрунтування впливу технологічних параметрів на склад та вихід паливного газу.
5. Розробка схема термічної переробки біомаси з утворенням паливного газу та його збагаченням
6. Виконати економічну оцінку роботи.



# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ

## 1.1 Термічна переробка рослинної сировини

Рослинна біомаса була одним з перших джерел енергії, яке використовувало людство. Наразі для отримання енергії з біомаси використовують три основні методи. Це спалювання, газифікація та піроліз. Спалювання повністю окислює рослинну біомасу і вивільняє теплову енергію. Однак ефективність цього процесу становить лише близько 10 % і цей метод є джерелом забруднення навколишнього середовища. Газифікація - це процес часткового окислення, в якому з рослинної біомаси виділяється газоподібне паливо, тоді як піроліз є першим кроком у процесі спалювання та газифікації [1].

Піроліз використовується для виробництва високоякісних, екологічно чистих, твердих, рідких і газоподібних продуктів із сировини, що містить майже всі органічні речовини. Важливою перевагою процесу піролізу є те, що він є самодостатнім, оскільки газоподібні та тверді продукти піролізу можуть бути використані для сушіння біомаси та живлення самого процесу. Енергетичні витрати на забезпечення термохімічного процесу зазвичай не перевищують 5% теплоти згоряння отриманого паливного продукту.

На рисунку 1.1 показані реакції процесу піролізу деревної біомаси. На рисунку 1.1 показані реакції процесу піролізу деревної біомаси з акцентом на три категорії продуктів, виявили, що на ранніх стадіях процесу піролізу (від 250°C до 300°C) більшість летких компонентів виділяються зі швидкістю в 10 разів більшою, ніж на наступних стадіях. З'ясовується, що більшість летких компонентів вивільняється в 10 разів швидше, ніж на наступних етапах [].

Процес піролізу органічних речовин дуже складний і складається з паралельних і послідовних реакцій. Довгі ланцюги сполук вуглецю, водню і кисню в рослинній біомасі розпадаються на менші молекули у вигляді

газоподібних, рідких і твердих продуктів в умовах піролізу. Швидкість і ступінь розкладання кожного з цих компонентів залежить від параметрів процесу, таких як температура реактора (піролізу), швидкість нагрівання рослинної біомаси, тиск, конфігурація реактора і характеристики сировини.

Етапи піролізу деревної біомаси:

1. Сушіння деревини до 120°C з видаленням вологи.
2. Початок розкладання деревини (150°C).
3. Виділення летких низькомолекулярних сполук деревини (270 - 275°C).
4. Піроліз сировини (380 - 500°C) [1,11].

Характеристики різного виду піролізу наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики термічної обробки

Параметр	Швидкий піроліз з низькими температурами	Швидкий піроліз з високими температурами	Повільний піроліз
Час процесу	1-3 с	1-3 с	5-30 хв
Розмір сировини	2-5 мм	2-5 мм	1-2 см
Вологість сировини, %	5-8	5-8	10-12
Температура, °C	430-530	600-900	500-700
Тиск, кПа	100	10-100	100
Вихід газу, %	До 30	До 75	До 40
Теплота згоряння газу, МДж/м <sup>3</sup>	10-20	10-20	5-10
Вихід твердого залишку, %	До 15	До 20	20-30
Теплота згоряння твердого залишку, %	28-33	28-33	28-33

Хімічний склад продуктів реакції можна змінювати в широкому діапазоні, регулюючи параметри процесу (температура, тиск, час реакції, наявність каталізатора).

## **1.2 Технологія швидкого піролізу**

При швидкому піролізі рослинну біомасу нагрівають до високих температур за відсутності кисню. Зазвичай при швидкому піролізі отримують рідкі продукти з виходом 60-75% (мас.) і, залежно від сировини, 15-25% (мас.) вуглецевої речовини та 10-20% (мас.) газоподібних продуктів. Основними особливостями процесу швидкого піролізу є висока теплопровідність і швидкість нагрівання, короткий час перебування продуктів крекінгу в зоні реакції і швидке охолодження парогазової суміші при точно контрольованій температурі реактора.

Технологія швидкого піролізу набула популярності у виробництві рідкого палива та інших хімічних продуктів. Вона також має потенціал для виробництва цінних хімічних продуктів з вищою доданою вартістю, ніж саме паливо. Технологія швидкого піролізу має відносно низькі інвестиційні витрати і високу енергоефективність порівняно з іншими процесами нафтопереробки, особливо в малих масштабах.

Найбільш відомі на сьогоднішній день технології швидкого піролізу можна класифікувати на наступні типи, виходячи з конструктивних особливостей реактора [2]:

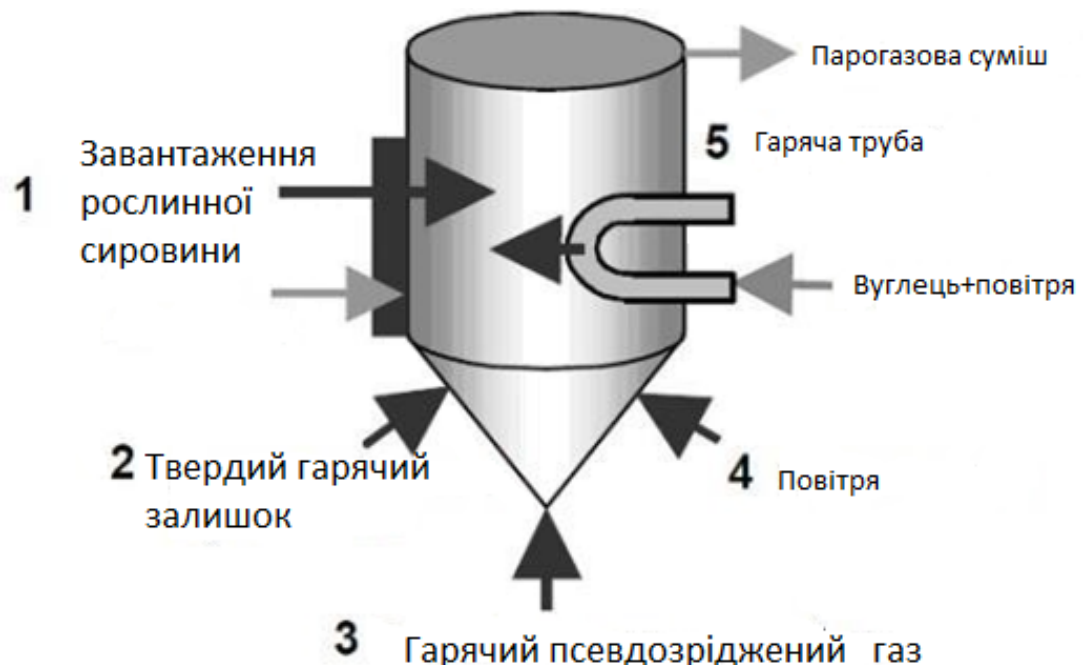
- піроліз у псевдозрідженому шарі
- піроліз у циркулюючому псевдозрідженому шарі;
- піроліз у двох реакторах з псевдозрідженим шаром;
- абляційний піроліз;
- піроліз у циклонних реакторах;
- піроліз у двошнекових реакторах;
- псевдозріджений піроліз;

- вакуумний піроліз.

Піролізні реактори можна розділити на дві великі групи залежно від способу нагрівання системи: прямий і непрямий.

Передача тепла здійснюється за допомогою газоподібних і твердих теплоносіїв. Передача тепла до частинок біомаси газоподібними теплоносіями відбувається шляхом конвекції, тоді як передача тепла твердими теплоносіями відбувається шляхом теплопровідності. Близько 90% теплообміну в реакторах з псевдозрідженим шаром відбувається за рахунок теплопровідності, а до 10% - за рахунок конвективного теплообміну при перемішуванні.

Поряд з конвективним і кондуктивним теплообміном у всіх типах реакторів має місце також теплообмін випромінюванням. Однак, для ефективного перетворення біомаси в рідке паливо в різних піролізних реакторах використовуються різні методи теплопередачі. На рисунку 1.1 і в таблиці 1.2. показані методи теплопередачі для різних типів піролізних реакторів.



Таблиця 1.2

Способи підведення теплових потоків, що використовуються у різних піролізних реакторах

<b>Способи підведення тепла</b>	<b>Типи піролізних реакторів</b>
Обігрів циркулюючим газом (конвективний)	Реактор з псевдозрідженим шаром
Стінка та гарячий твердий залишок (теплопровідність)	Циркулюючий псевдозріджений шар
Підігрів циркулюючого твердого залишку топковим газом (конвекція)	Конус, що обертається
Прямий контакт з нагріваючою поверхнею (теплопровідність)	Вакуумний реактор
Обігрів стінки (теплопровідність)	Абляційний реактор
Нагрівна трубка (теплопровідність)	Шнековий реактор
Електромагнітний обігрів (випромінювання)	Мікрохвильова піч реактора
Сонячний обігрів (випромінювання)	Реактор з киплячим шаром

### **1.3 Піроліз в киплячому шарі**

Перевагами реакторів піролізу в псевдозрідженому шарі є їхня проста конструкція та легкість в обслуговуванні. У цих реакторах забезпечується точний контроль температури і контакт між газом і твердими матеріалами. Теплопередача досягається завдяки високій щільності твердих речовин у псевдозрідженому шарі. Пісок використовується як тверда фаза псевдозрідженого шару для швидкого нагрівання рослинної біомаси в безкисневому середовищі, що призводить до її розкладання з виділенням суміші вуглецевих частинок, пари і газу. Реактор з псевдозрідженим шаром показаний на рисунку 1.3. Після реакції піролізу вуглецеві частинки видаляються за допомогою циклонного сепаратора і збираються в приймачі для зберігання. Парогазова суміш, що залишилася, швидко охолоджується в теплообміннику, конденсується і направляється в резервуар для зберігання.

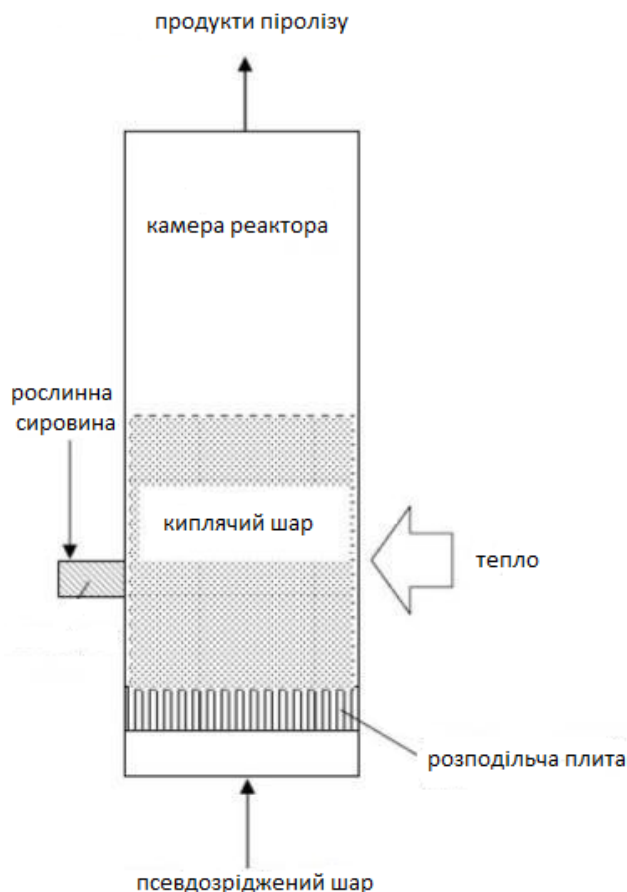


Рисунок 1.3 Технологічна схема реактора піролізу киплячого шару

Піроліз у псевдозрідженому шарі дуже популярний, оскільки він дає високоякісні піролізні рідини з виходом приблизно 70-75% від маси сухої сировини. Вуглецеві частинки відокремлюються від псевдозрідженого шару. Час перебування твердих частинок і парогазової суміші в псевдозрідженому шарі регулюється швидкістю потоку псевдозрідження. Важливою особливістю піролізу в псевдозрідженому шарі є використання рослинної біомаси з невеликим розміром частинок (2-3 мкм) для досягнення високої швидкості нагрівання сировини. Це вимагає витрат енергії на подрібнення біомаси [ 3].

#### 1.4 Піроліз у циркулюючому псевдозрідженому шарі

Піроліз у циркулюючому псевдозрідженому шарі має схожі характеристики з піролізом у псевдозрідженому шарі, за винятком того, що

час перебування пароповітряної суміші і вуглецевих частинок у реакторі коротший. Як наслідок, швидкість газу вища, ніж у реакторах з псевдозрідженим шаром, а вміст вуглецевих частинок у піролізному розчині вищий. Однією з переваг цього методу є велика потужність реактора, незважаючи на складну гідродинаміку. Існує два типи реакторів з циркулюючим псевдозрідженим шаром: з одноциркуляційним псевдозрідженим шаром і двоциркуляційним псевдозрідженим шаром.

На рисунку 1.4 показано піролізний реактор з одним циркулюючим псевдозрідженим шаром. Біомаса подається в реактор висхідним потоком, де відбувається інтенсивний контакт між інертними частинками (піском).

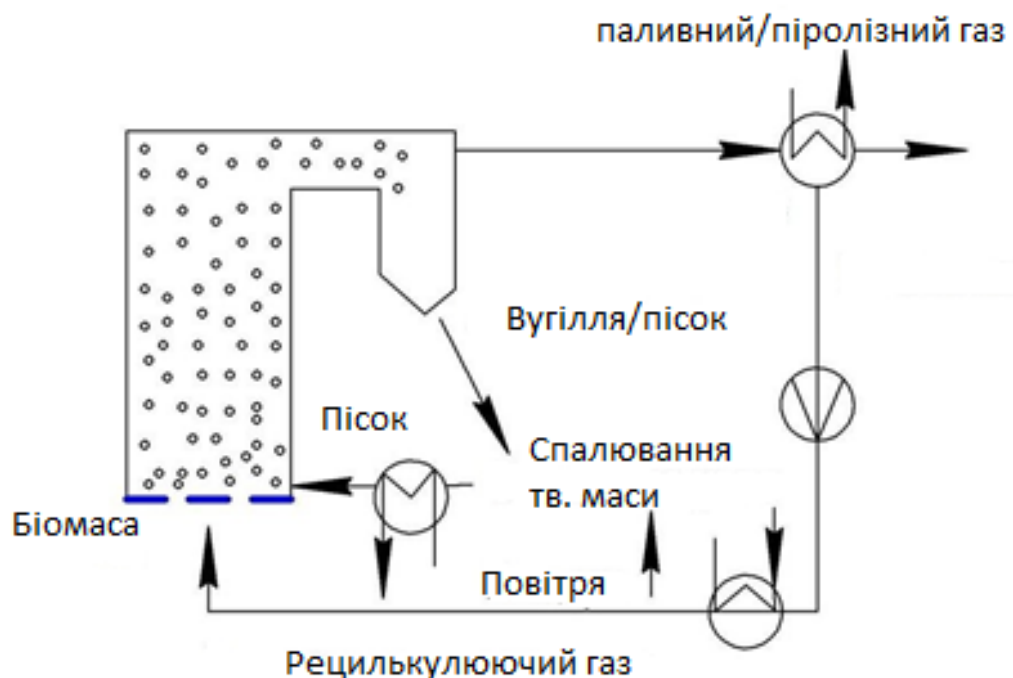


Рисунок 1.4. Технологічна схема реактора піролізу з одним циркулюючим киплячим шаром

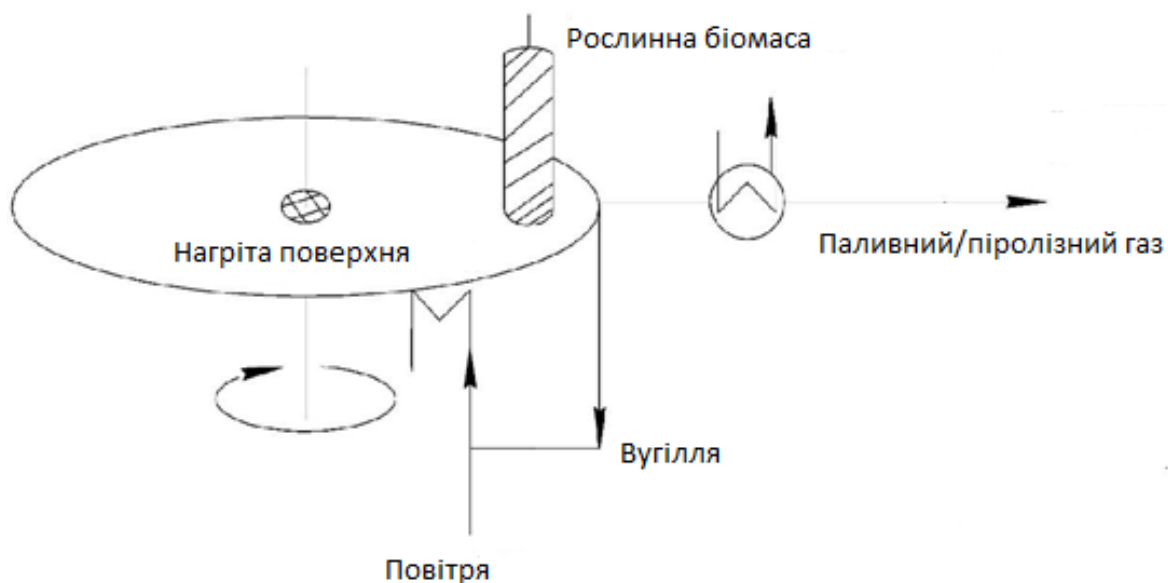
Вуглецеві частинки з реактора разом з піском направляються в камеру згоряння, де відбувається спалювання вуглецевих частинок. Основною перевагою технології піролізу в циркулюючому киплячому шарі порівняно з піролізом у псевдозрідженому шарі та абляційним піролізом є пряме теплопостачання рослинної біомаси за рахунок рециркуляції піску, нагрітого при згорянні вуглецевих частинок.

## 1.5 Абляційний піроліз

Абляційний піроліз відрізняється від піролізу в циркулюючому киплячому шарі способом передачі тепла через гарячі металеві поверхні реактора і тим, що не використовується псевдозріджений газ. Механічна дія нагрітих стінок реактора використовується для пресування рослинної біомаси. Реактори абляційного піролізу можуть використовувати частинки рослинної біомаси розміром до 20 мм. З іншого боку, така конфігурація є більш складною через механічну природу процесу [ 4].

Реактори абразивного піролізу характеризуються високим тиском (притисканням частинок біомаси до нагрітих стінок реактора) та відцентровими та механічними силами, що притискають частинки біомаси до нагрітих стінок реактора; високий відносний рух між частинками біомаси та стінкою реактора; нагрівання стінок реактора до температури  $<600^{\circ}\text{C}$ .

Принцип абляційного піролізу проілюстровано на рисунку 1.5.



Стінки абляційного реактора нагріваються і обертаються відпрацьованими газами, а рослинна біомаса притискається до нагрітої поверхні реактора ( $600^{\circ}\text{C}$ ). Відпрацьовані гази утворюються в результаті спалювання вуглецевих частинок або піролізних газів.

Загалом, технологія абляційного піролізу має наступні обмеження:



- обмежений коефіцієнт тепловіддачі до гарячої поверхні реактора через непрямий нагрів. Це пов'язано з відносно невеликою різницею температур між гарячими димовими газами (800°C) і камерою піролізу (близько 500°C).

- Обмеження щодо морфології сировини (форма, структура і щільність частинок), розміру частинок і процесів псевдозрідженого нагріву [ ].

Спрощена схема абразивного пластинчастого реактора, розробленого в лабораторії Астонського університету, показана на рисунку 1.6.

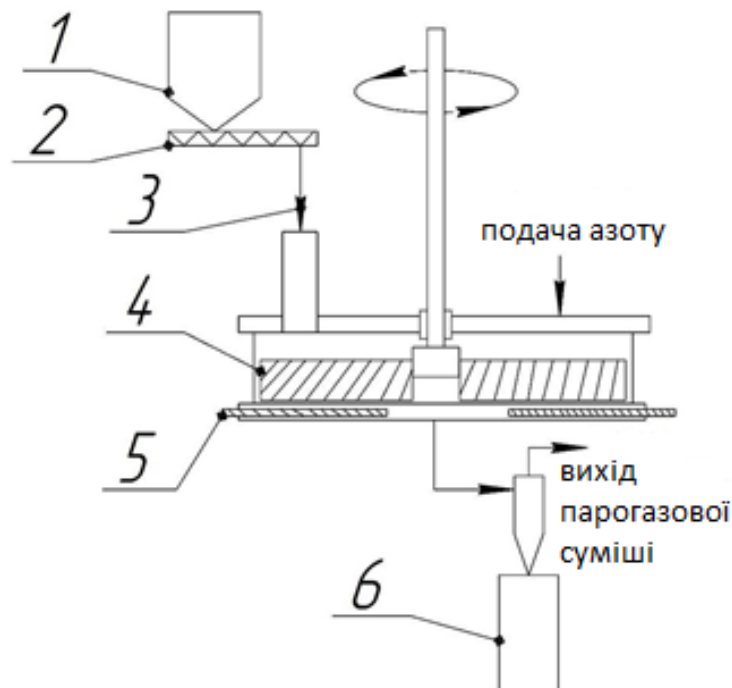


Рисунок 1.6 Принципова схема абляційного пластинчастого реактора

1 - герметичний бункер, 2 - шнековий живильник, 3 - тріска, 4 - поворотні лопаті зі змінним кутом нахилу, 5 - патроний нагрівач, 6 - бак для збору деревинного вугілля.

Висушені частинки біомаси в розмірі до 6,35 мм подаються в герметичний реактор, що продувається азотом, шнековим живильником. Чотири асиметричні лопатки, що обертаються зі швидкістю до 200 об/хв, генерують механічний тиск на частинки та притискають частинки на розігріту

(до 6000С) поверхню реактора. Механічне вплив лопаток призводить частинки до піролізу (термічного руйнування) в умовах високого відносного руху поверхні реактора, що нагрівається. Газоподібні та пароподібні продукти, а також вугілля виходять із зони реакції з розбавленим азотом, вуглисті частинки видаляються в циклоні.

## **1.6 Камери піролізу зі шнеком**

Шнекові реактори (також звані гвинтовими реакторами) складаються з одного або декількох обертових гвинтів, які переміщують біомасу через циліндричну посудину разом з теплоносієм (наприклад, гарячим піском або металевими кульками). Передача тепла відбувається через стінки реактора і не вимагає використання інертного газу-носія. Недоліком гвинтових піролізних реакторів є те, що час перебування парогазової суміші становить 5-30 секунд, що сприяє вторинним реакціям парогазової суміші [75]. У той же час, шнекові реактори можуть переробляти матеріали з різними морфологічними характеристиками більш ефективно, ніж реактори з псевдозрідженим шаром. Гвинтові реактори піролізу мають наступні характеристики: а) вони компактні, б) їх можна експлуатувати при низьких температурах (4000°С), в) процес піролізу є безперервним.

Безперервний: Дослідницький центр Карлсруе (Німеччина) використав двошнековий піролізний реактор для переробки сланцевого масла, реалізувавши установку продуктивністю 500 кг/год. Схема піролізного реактора зі шнеками показана на рисунку 1.7.

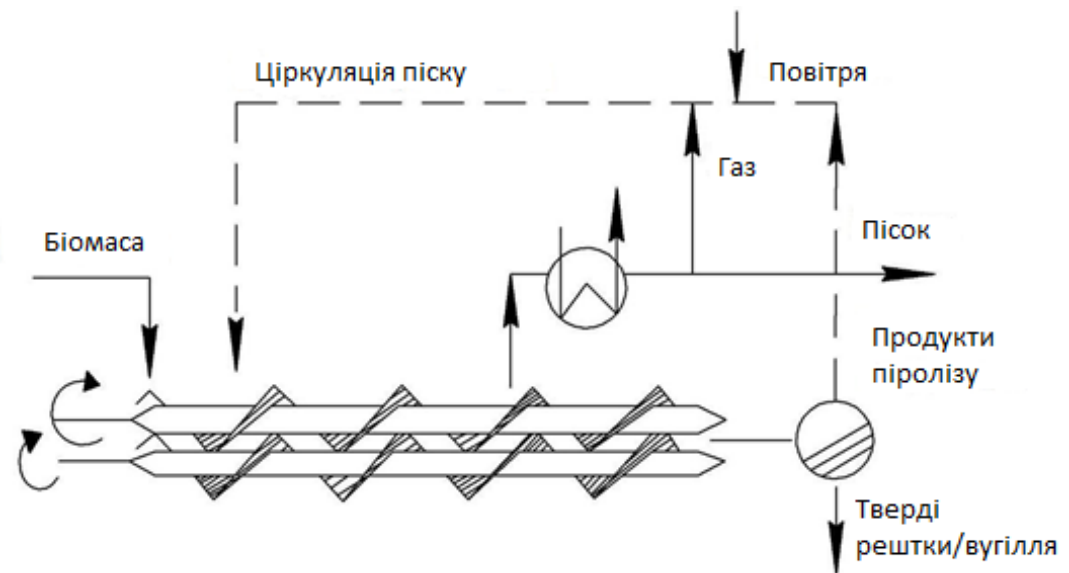


Рисунок 1.7 Схема реактора піролізу зі шнеком

У штаті Айова (США) була введена в експлуатацію перша комерційна піч шнекового піролізу потужністю 50 т/добу (жовтень 2009 р.). Вона переробляє сільськогосподарські відходи для виробництва рідкого та твердого палива (рис. 1.8). Зліва - сушарка/дробарка. Праворуч - реактор і конденсатор [].



Рисунок 1.8 – Промислова установка реактора піролізу зі шнеком

## 1.7 Циклонні камери піролізу

Циклонні реактори об'єднують процеси швидкого піролізу та високотемпературного очищення газу в одній установці. Ця інтегрована установка складається з вихрового реактора (циклону) з обертовим сепаратором (рис. 1.9). Відцентрові сили в реакторі змітають частинки і ковзають разом з газовим потоком. Ефективний теплообмін відбувається в реакторі завдяки безпосередньому контакту біомаси з теплоносієм.

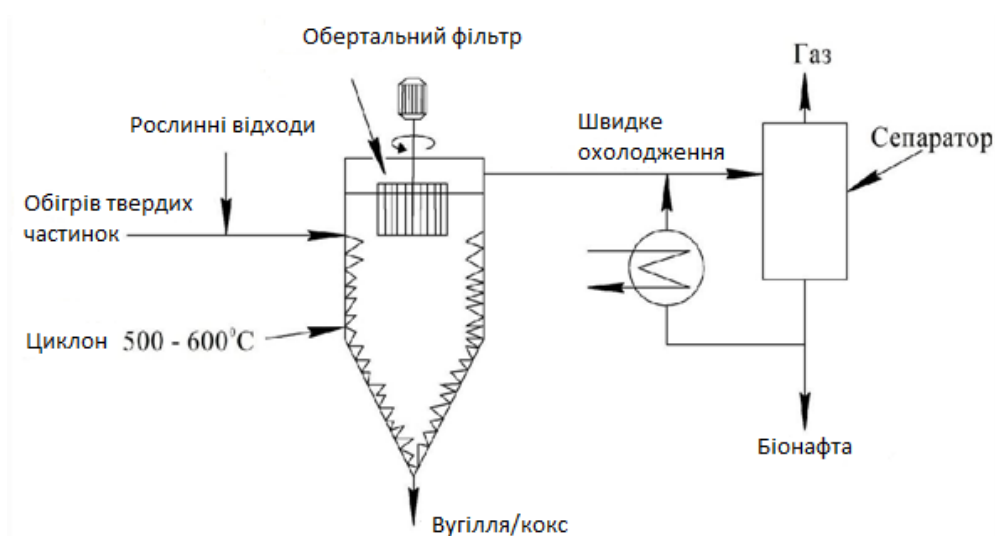


Рисунок 1.9 – Схема циклонної камери піролізу

За час транспортування донизу в реакторі частки біомаси сушаться, нагріваються та виділяють леткі речовини. Середня температура процесу складає 450-550 °С. Час перебування летких речовин в камері від 0,5 до 1 с, у зв'язку з чим вторинне розкладання завершується. Через газовідвод у центральній частині циклона, за допомогою обертового сепаратора, з парогазової суміші відокремлюються дрібні тверді частинки. В ньому частинки розміром від 1 мікрона захоплюються в пучок каналу та обертаються навколо загальної осі. Зібрані частинки прилипають до стінок каналу, поки періодично не видаляються з реактора з основним потоком твердих частинок через нижній вихід циклону. Циклонний реактор інтегрований у цілісну систему, що складається з подачі біомаси, камери спалювання напівкоксу для нагрівання теплоносія, очищення та конденсації парогазової суміші з виділенням біонафти. Були проведені попередні

дослідження визначення ключових параметрів процесу, таких як температура реактора, час перебування сировини, розмір частинок деревини і т.д. Перші результати виявилися дуже багатообіцяючими: була отримана біонафта з високою теплотворною здатністю та низькою в'язкістю, з виходом понад 50% у перерахунку на суху речовину [6].

### **1.8 Вакуумний піроліз у рухомому шарі.**

Процес вакуумного піролізу був розроблений в університеті Лавалля (Канада) і Pirovac (Канада). Даний процес включає в себе комбінацію умов повільного і швидкого піролізу. Тверде паливо нагрівається відносно повільно до температури більш високої, ніж у повільного піролізу, і парогазова суміш швидко видаляється з реактора, оскільки процес здійснюється за тиску менше 20 кПа.

Вакуумний піроліз не є різновидом швидкого піролізу, оскільки використовується більш низька швидкість нагріву. Однак головною метою вакуумного піролізу, як і швидкого піролізу, є отримання рідкого палива з високим виходом. Фрагментовані продукти випаровуються і швидко виводяться з реактора за допомогою вакууму. При роботі в умовах вакууму знижується час перебування парогазової суміші в реакторі, тим самим усувається утворення вторинних реакцій термічного розкладання. Завдяки низьким потребам теплопередачі можна використовувати більші частинки рослинної біомаси порівняно з іншими видами швидкого піролізу. Немає необхідності використання інертного газу - носія.

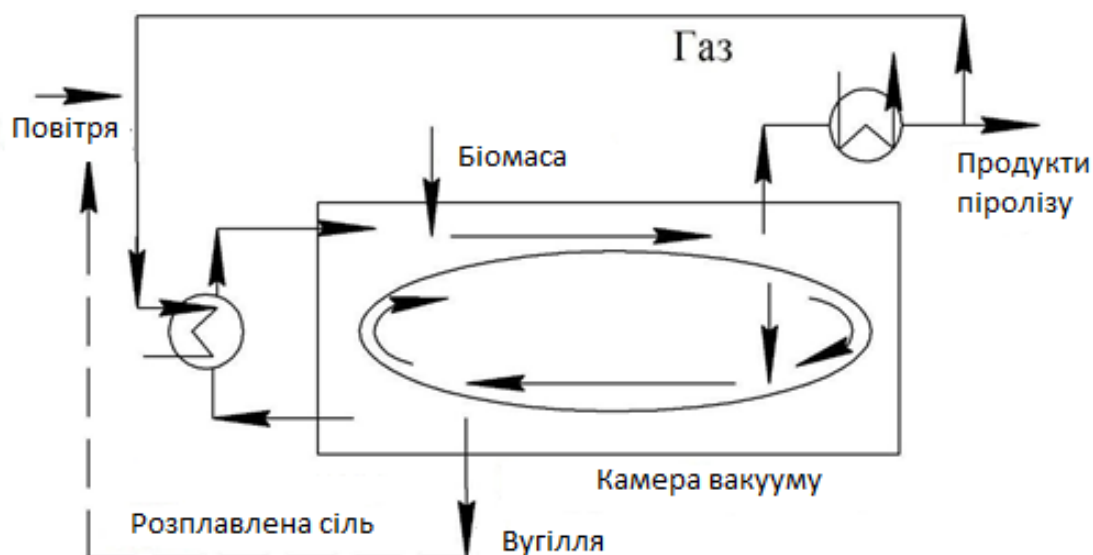


Рисунок 1.10 – Вакуумна камера піролізу рослинної біомаси

В таблиці 1.3 наведені провідні компанії, що займаються розробленням і впровадженням технологій швидкого піролізу біомаси.

Таблиця 1.3

Організація, країна	Технологія, реактор	Продуктивність, кг/год
Ensyn Group Inc., Канада	Два реактора с КШ (RTP- технологія)	6250
		1875
		1670
		100
		100
		40
		10
Red Arrow, США	Два реактора с КШ Технологія Ensyn	1250
		1000
		125
ENEL, Італія	Два реактора с КШ Технологія Ensyn	625
VTT, Фінляндія	Два реактора с КШ Технологія Ensyn	20
	КШ	1

	КШ	<1	
Pasquali-ENEL, Італія	ЦКШ	25	
GRES, Греція	ЦКШ	10	
Dynamotive EnergySystems, Канада	КШ	8340	
		540	
		<1	
		<1	
Dynamotive-RTI, Канада	КШ	80	
RTI, Канада	КШ	15	
NREL, США	КШ	20	
		<1	
	Абляційний вихровий	20	
BFH/IWC, Німеччина	КШ	6	
		<1	
INETI, Португалія	КШ	5	
BTG-Twente, Голандія	Абляційний конусний	250	
		50	
Union Fenosa- Університет Сантьяго, Іспанія	КШ Технологія Університету Ватерлоо	200	
Гамбурзький Університет, Німеччина	КШ	50	
Мельбурзький Університет, Австралія	КШ	5	
Університет Ватерлоо, Канада	КШ	3	
Астонський Університет, Великобританія	КШ	<1	
		Абляційний пластинчастий	5
		3	
Університет Leeds, Великобританія	КШ	<1	

Олденбурзький Університет, Німеччина	КШ	<1
Технологічний Університет, Малайзія	КШ	<1
Університет Sassari, Італія	КШ	<1
Університет Сарагоса, Іспанія	КШ	<1

Проте всі типи реакторів швидкого піролізу мають технологічні переваги та недоліки порівняно один з одним. Було розглянуто переваги та недоліки різних видів піролізних реакторів, які наведено в таблиці 1.4 [11].

Таблиця 1.4

Переваги та недоліки технологій

Реактори	Переваги	Недоліки	Утворення піролізного продукту
Реактор із щільним шаром	Простота конструкції. Надійність під час експлуатації. Можливість роботи незалежно від розмірів частинок використовуваної рослинної біомаси.	Утворення великої кількості вуглистих частинок. Тривалий час перебування твердих частинок. Малозольна переносимість. Труднощі видалення вуглистих частинок.	35-50 %
Реактор з обертальним конусом	Відсутність необхідності використання газаносія. Менше зношування	Складний процес. Переробка дрібних частинок. Використання в малих масштабах.	65%
Реактор з киплячим шаром	Простота конструкції. Легкість обслуговування. Точне регулювання температури. Можливість роботи в	Необхідність використання частинки рослинної біомаси маленьких розмірів.	70-75%



	великих масштабах		
Реактор з циркулюючим шаром	Простота технології. Точне регулювання температури. Можливість використання частинок рослинної біомаси великих розмірів.	Неможливість використання великих масштабів. Складна гідродинаміка.	70-75%
Конусний реактор	Переміщення нагрітого піску і рослинної біомаси за рахунок відцентрової сили. Відсутність необхідності використання газу. Менший знос.	Складний процес. Необхідність використання частинки рослинної біомаси маленьких розмірів. Не проведені роботи у великому масштабі.	65%
Вакуумний реактор	Виробництво чистого рідкого палива. Можливість переробки більших часток 3-5 см. Відсутність необхідності використання газу. Ведення процесу вакуумного піролізу за низької температури. Нескладна система конденсації з виділенням піролізної	Повільний процес. Довгий час перебування твердих частинок. Необхідність великогабаритного обладнання. Низька теплопередача. Утворення великої кількості води.	35-50%
Шнековий реактор	Компактний. Відсутність необхідності використання газу-носія. Можливість використання частинки рослинної біомаси великих розмірів.	Конструкція реактора, що складається з рухомих частин. Теплопередача в невеликих об'ємах	30-50%

	Невисока температура процесу.		
Абляційний реактор	Відсутності необхідності використання інертного газу. Можливість переробки частинки рослинної біомаси з великими розмірами. Більш інтенсивна система. Помірна температура.	Дорожнеча реактора. Низька швидкість реакції	70%

Велика увага була приділена швидкому піролізу біомаси завдяки можливості переробки деревних відходів в екологічно чисту енергію. Технологія швидкого піролізу деревини дає можливість виробляти піролізну продукти з високим виходом. Кінцевою метою технології швидкого піролізу є отримання високоцінного палива для конкурування з невідновлюваними джерелами енергії.

Піропаливо, одержуване за технологією швидкого термокондуктивного піролізу, придатне для прямого спалювання в котлах, замінюючи традиційні види палива. Для використання в газових турбінах і дизельних двигунах піропаливо потребує підвищення якості. Це є серйозним недоліком використання всіх технологій піролізу, зазначених вище. Вирішенням проблеми є газифікація піролізної рідини, що дає змогу отримати набагато чистіше паливо.

### 1.9 Удосконалення технології отримання біопалива

Процеси термічного розкладання деревної біомаси з утворенням паливного газу та подальшою його газифікацією можна представити у вигляді наступних технологічних стадій (рис. 2.1):

- швидкий термокондуктивний піроліз деревини;
- газифікація піролізного газу у факелі

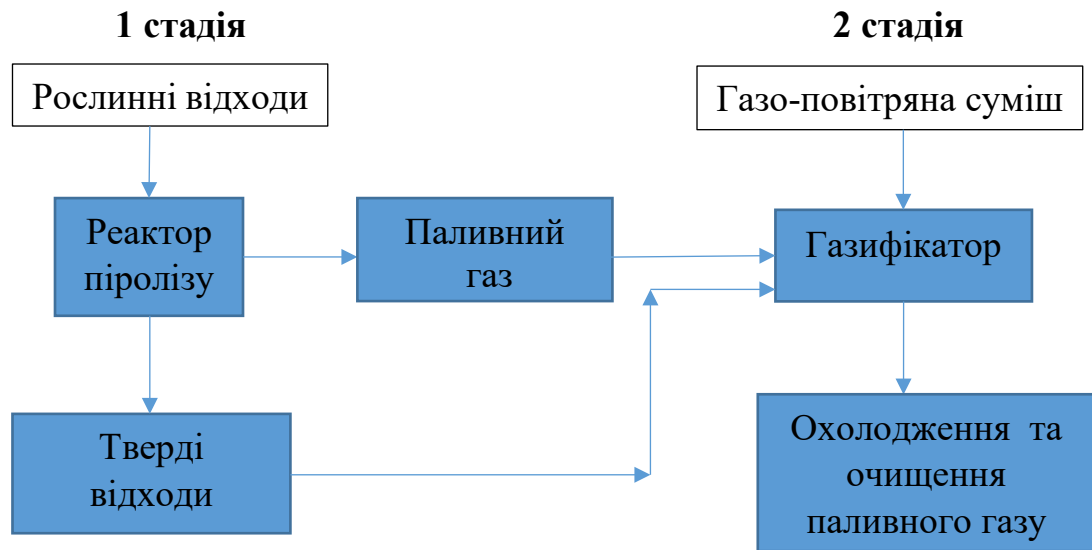


Рисунок 1.11 – Схема термічної переробки біомаси з утворенням паливного газу та його збагаченням

Перша технологічна стадія є конверсією деревної біомаси в піролізний газ. Процес термічного розкладання деревної біомаси можна умовно поділити на кілька етапів. Перший етап починається за 100°C. При цьому відбувається зниження ваги зразка біомаси, переважно за рахунок випаровування вологи, що міститься в деревині. Потім втрата ваги відбувається за рахунок термічного розкладання геміцелюлози при температурі 150-260 ° С залежно від типу біомаси. Основне розкладання біомаси відбувається на третьому етапі в діапазоні температур від 300 - 600 ° С, коли розкладаються целюлоза та лігнін. Термічне розкладання целюлози зазвичай відбувається при 250-380 ° С, а розкладання лігніну відбувається в ширшому температурному діапазоні 280 - 650 ° С.

Продуктами піролізу деревини є твердий нелеткий вуглецевий залишок та газ. Вихід продуктів піролізу з деревини залежить від її породи внаслідок відмінностей їх фізико-хімічного складу та структури. Фактично вихід вугілля залежить не має від породи деревини, як від режиму піролізу. Залежно від породи деревини та умов піролізу можна досягти максимального виходу кожного із продуктів цього конверсійного процесу.

Енергетична складова піролізу визначається вмістом води та початковим складом біомаси. На практиці неможливо створити повністю безкисневе середовище і таким чином слабкий процес окислення завжди протікатиме. Тим не менш, ступінь окислення органічних речовин при піролізі є відносно невеликим порівняно зі згорянням, де відбувається майже повне окислення органічних речовин. Також істотна частка вуглецю в сировині залишається і не виділяється у вигляді  $\text{CO}_2$  [ 5-8].

Піроліз відбувається, як правило, за відносно низьких температур (зазвичай близько 300-550 °C). Високі температури піролізу можуть викликати полімеризацію, у результаті формуються великі молекули (зокрема ароматичних і аліфатичних сполук), і навіть відбувається подальше термічне розкладання деяких компонентів сировини.

Летючі продукти швидкого термокондуктивного піролізу деревини у вигляді парогазової суміші, виходячи з реактора, піддаються охолодженню для виділення парів цінних продуктів, що містяться в ній, шляхом їх конденсації.

До складу парогазової суміші (ПГС), отриманої в результаті швидкого піролізу деревної біомаси, входять пари, аерозолі, органічні та неорганічні компоненти, неконденсовані гази, а також частинки вугільного пилу. Піролізний газ є несучою фазою суміші. Відбувається поділ вторинних реакцій парогазової суміші на гетерогенні та гомогенні, що включають такі реакції, як розкладання, часткове. Незважаючи на те, що парогазова суміш має складний хімічний склад, велика кількість різних реакцій є вторинними.

Друга стадія виконується за допомогою газифікатора, в який подається піролізний газ, газоповітряна суміш та тверді залишки (кокс), де виконується газифікація при температурах до 610 °C, таким чином утворюється паливний газ, який очищується та подається до споживача.

## Висновки

1. Виконано аналіз способів термічної переробки рослинної біомаси з метою отримання паливного газу.

2. Паливо, отримане за технологією швидкого термокондуктивного піролізу, придатне для прямого спалювання в котлах, замінюючи традиційні види палива.
3. Для використання в газових турбінах і дизельних двигунах піропаливо потребує підвищення якості. Це є серйозним недоліком використання всіх технологій піролізу, зазначених вище.
4. Вирішенням проблеми є газифікація піролізної рідини, що дає змогу отримати паливо з більшою теплотворною здатністю.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

### 2.1 Модель процесу газифікації продуктів піролізу

На рис. 2.1. представлена фізичний процес швидкого термічного піролізу рослинної біомаси. Після подачі рослинної біомаси в камеру піролізу, що обертається, відбувається миттєве нагрівання біомаси, термічне розкладання і видалення коксу із зони реакції. При термічному розкладанні рослинної біомаси виділяється парогазова суміш, яка частково зазнає вторинного розкладання. Термічне розкладання частки рослинної біомаси відбувається на нагрітій поверхні камери піролізу. У процесі термічного розкладання біомаси градієнт температури впливає на швидкість реакції, яка значно залежить від розмірів рослинної біомаси [ ].

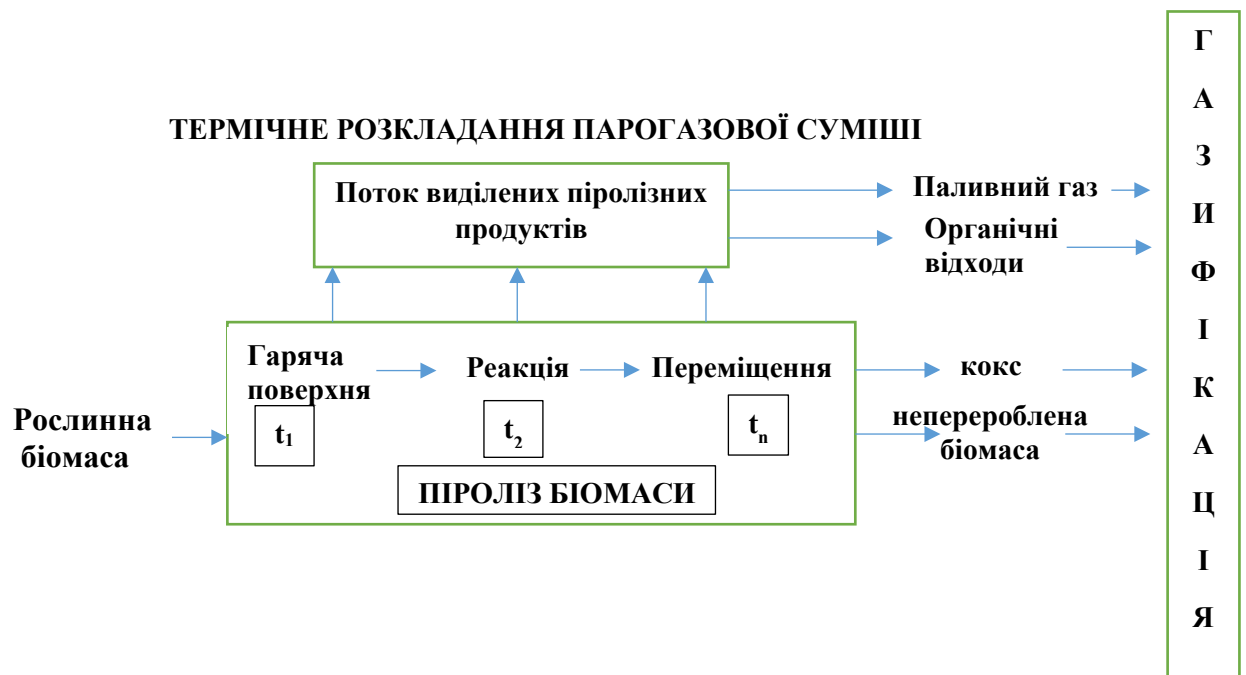


Рисунок 2.1 – Модель процесу збагачення газу

Обробка парогазової суміші зводиться до двох основних способів: конденсації та уловлювання твердих частинок, що містяться в парогазовій

суміші. Ці процеси виконуються відповідно у відділеннях газоочищення та конденсації.

Вибір технологічної схеми обробки парогазової суміші визначається:

- а) складом парогазової суміші і кількістю, а також характером домішок, що містяться в ньому;
- б) температурою парогазової суміші при виході з реактора;
- в) загальною годинною кількістю парогазової суміші, що утворюється;
- г) вимогами до неї як товарного продукту.

З фізико-хімічного боку парогазову суміш слід розглядати як складну суміш, що складається з газоподібних, пароподібних та рідко-краплинних систем. Постійність складу парогазової суміші є одним із основних технічних завдань. Вирішення цих завдань залежить від багатьох факторів. У тому числі вирішальна роль належить тепловому режиму переробки рослинних відходів [4].

Для ефективного використання піролізних продуктів з електроенергетичною метою проводиться підготовка піролізних продуктів (тверді рештки та газ) до процесу газифікації. При підготовці піропродуктів швидкого термокондуктивного піролізу виконується підігрів до температури 70<sup>0</sup>С, що дозволяє не змінюючи хімічного складу піролізних продуктів досягати найбільш відповідного значення коефіцієнта кінематичної в'язкості для подачі та розпилення у форсунці. З метою очищення піролізної рідини від твердих частинок застосовуються найпоширеніші листові фільтри періодичної дії з тканинною перегородкою. У процесі роботи фільтруючі елементи листового фільтра занурюються в резервуар і створюють певний вакуум. При цьому піролізний газ проходить усередину елементів, а тверді частинки залишаються на поверхні. [15].

Процес газифікації пірогазу та коксу здійснюється у факелі при температурі 800 – 1300<sup>0</sup>С та тиску 100 – 300 кПа усередині реактора. Краплі палива випаровуються в атмосфері гарячого газу та взаємодіють з окислювачем, утворюючи смолоскип.

Як окислювач служить повітря. Отриманий газ на 90 - 95% (у перерахунку на сухий газ) складається з окису вуглецю та водню. У ньому містяться також двоокис вуглецю та метану. Процес відбувається в автотермічних умовах. Виділення тепла здійснюється за рахунок екзотермічних реакцій газифікації з утворенням окису та двоокису вуглецю.

Термічне розкладання піролізних продуктів всередині камери газифікації відбувається наступним чином: температура газифікації в межах 600-1000 °С; в процесі газифікації спостерігається стадії нагрівання, випаровування, термічного розкладання, мікрровибухи та газифікація. Тобто при 70-150 °С відбувається випаровування летких речовин та термічне розкладання органічних речовин та молекул газу. Потім спостерігається збільшення в об'ємі газоподібних продуктів та утворення герметичної вугільної поверхні. Різниця тисків молекул газу та всередині реактору призводить до мікророзриву та газифікації окремих елементів складу палива. На рисунку 2.2 наведені реакційні зони в генераторі.

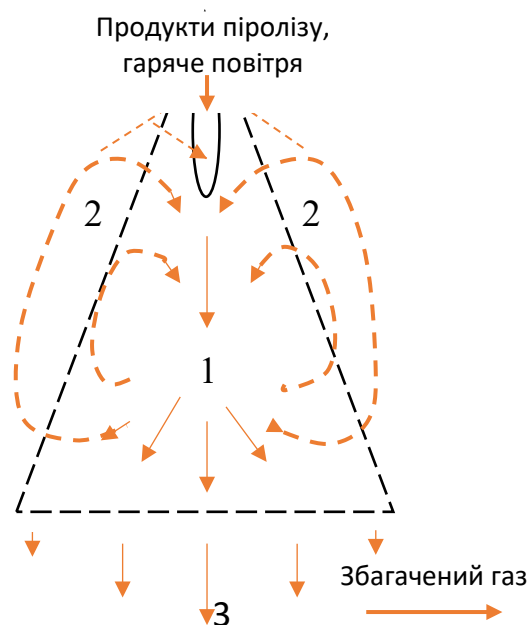


Рисунок 1.2 – Модель процесу газифікації продуктів піролізу  
1 – зона смолоскип, 2 – зона циркуляції потоків виділеного газу, 3 – зона завершення реакцій.



В камеру газифікації подаються продукти піролізу (газ та тверді рештки біомаси) з гарячим повітрям. Вологий газ випаровується під дією високих температур в атмосфері гарячого повітря в зоні 1 та 2. Потік окислювача підтягує випаровуване паливо з зони 2 в зону 1. В зоні 1 відбуваються реакції відновлення  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$ , конверсія непрореагованого палива та розщеплення вуглецю до сажи, яка завершується в зоні 3, де відбувається газифікація сажи. Відмінною особливістю газифікації палива є виділення 0,5-3% сажи. При досягненні термодинамічної рівноваги в процесі газифікації вуглець в продуктах реакції повинен бути відсутнім. По умовам термодинамічної рівноваги висококалорійний газ можна отримати при температурі до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . При температурі нижче  $600\text{ }^\circ\text{C}$  спостерігається значне сажеутворення. Виконання процесу газифікації палива більше  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  приводить до необхідності конструктивної зміни реактору.

## 2.2 Обґрунтування математичної моделі газифікації

Для розробки математичної моделі за рахунок прийнятих рішень, фізичну картину процесу газифікації піролізних продуктів описується наступним чином:

- витрати піролізних продуктів;
- випаровування вологи з піролізних продуктів;
- термічне розкладання піролізних продуктів.

Первічне розкладання відбувається в турбулентній зоні за рахунок сил аеродинаміки та кавітації молекул газу, які діють при їх русі. Висока відносна швидкість між розпиленням газоповітряної суміші та подачею твердих рештків утворюються аеродинамічні сили, таким чином збільшується інтенсивність теплообміну та прискорюється термічне розкладання (вторинне).

Витрати піролізних продуктів визначаються з формули:

$$G_{nir.np} = \kappa_{витр} \frac{\pi d_c^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{nir.np}}} \quad (2.1)$$

де  $\kappa_{витр}$  – коефіцієнт витрат для умов гідравлічної подачі піропродуктів:

$$\kappa_{витр} = \frac{1}{\left(1,23 + \frac{58l_c}{Re d_c}\right)} \quad (2.2)$$

Критерій Рейнольдса :

$$Re_H = \frac{g_{nom} D_\Gamma}{\mu} \quad (2.3)$$

$g_{nom}$  - характерна швидкість потоку піропродуктів, м/с;

$D_\Gamma$  - гідравлічний діаметр, м;

$\mu$  - кінематична вязкість, м<sup>2</sup>/с.

$$D_\Gamma = \frac{4\pi r_c^2}{2\pi r_c} \quad (2.4)$$

Середній діаметр частки газу гідравлічного ророзпилення визначається емпіричним відношенням:

$$d_{част} = We^{-0.266} Lp^{-0.266} d_c \quad (2.5)$$

Де критерій Вебера та Лапласа визначаються за співвідношеннями:

$$We = \frac{\rho_{nir.np} g_{nom}^2 d_c}{\sigma} \quad (2.6)$$

$$Lp = \frac{\sigma \rho_{\text{нр.нр}} d_c}{\mu_{\text{нр.нр}}} \quad (2.7)$$

Кореневий кут смолоскипу для гідравлічного розпилювання :

$$\text{tg} \left( \frac{\gamma}{2} \right) = 0.011 We^{0.32} Lp^{0.07} \frac{\rho_{\text{газ}}^{0.18}}{\rho_{\text{нр.нр.}}} \quad (2.8)$$

Випаровування багатоконпонентного палива має ті ж основи, що і теорія пароутворення однокомпонентного палива з умовою, що всі компоненти випаровуються одночасно.

Враховуючи випаровування одної частки палива, швидкість випаровування окремого компоненту може бути визначено:

$$\omega_i = D_{i,b} \rho_{\text{нр.нр}} 4\pi r_{\text{част}}^2 \frac{dx_i}{dr} + x_i \omega_{\text{заг}} \quad (2.9)$$

де  $\omega_i$  - швидкість випаровування компонента (i);

$\omega_{\text{заг}}$  - загальна швидкість випаровування частки;

$r_{\text{част}}$  - радіус частки;

$D_{i,b}$  - бінарний коефіцієнт дифузії між компонентом та атмосферним газом;

$X_i$  – масова доля компонентів в газоподібній фазі.

При умовах на поверхні частки ( $r_{\text{част}} = R_{\text{ПГс}}, T_{\text{част}} = T_{\text{ПГс}}$ ):

$$\omega_{\text{заг}} = \frac{4\pi r_{\text{част}} \lambda_c}{c_{\text{нр.нр}}} \text{Ln}(1 + B_T) \quad (2.10)$$

$B_T$  – кількість Теплопередачі Сполдингу:

$$B_T = \frac{c_{nir.np} \cdot (T_{ПГс} - T_{nir.np})}{L(T_{nir.np})} \quad (2.11)$$

Коефіцієнт частки випаровування:

$$\varepsilon_i = \frac{\omega_i}{\omega_{заг}}, \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 1$$

Зпрощене рівняння швидкості випаровування кожного компоненту запишеться в наступному вигляді:

$$\omega_i = 4\pi r_{част} \rho_{nir.np} \varepsilon_i D_i \ln(1 + B_M) \quad (2.12)$$

Згідно з рівнянням (2.12) швидкість компонента може бути отримана за допомогою парової масової частки від поверхні самої частинки до безкінченності.

Сполдингове число масопереносу  $B_M$  визначається:

$$B_M = \frac{y_{nir.np} - y_{ПГс}}{1 - y_{nir.np}} \quad (2.13)$$

де  $y_{nir.np}$  - масова частка піролізних продуктів на поверхні частки;  $y_{ПГс}$  - масова частка піролізного продуктів в об'ємі газу (масова частка паливних парів біля поверхні частинок газу).

Модель газоутворення для багатоконпонентного газу, який розширюється при його русі. Кінцевий результат швидкості випаровування газів:

$$\omega_i = 4\pi r_{\text{част}} \rho_{\text{нір.нр}} \varepsilon_i Sh_{i,0} D_i \ln(1 + B_M) \quad (2.14)$$

Середнє число Шервуда для сегменту, що пов'язує число Рейнольдса та Шмидта:

$$Sh_{i,0} = 2 + 0,6 Re^{1/2} Sc_i^{1/3} \quad (2.15)$$

Число Шмидта для і-того виду визначається як співвідношення в'язкості до бінарного коефіцієнту дифузії:

$$Sc_i = \frac{\mu}{D_{i,b}} \quad (2.16)$$

$$\frac{dr_{\text{част}}}{d\tau} = \left[ 1 + \frac{0.277 Re^{0.5} Sc^{0.33}}{1 + \frac{1.232}{Re \cdot Sc^{1.33}}} \right] \frac{\rho_{\text{ПГс}} D_{i,b} \ln(1 + B_M)}{\rho_{\text{нір.нр}} r_{\text{част}}} \quad (2.17)$$

На стадії газифікації піролізних продуктів відбувається нагрівання часток та випаровування летких компонентів з їх поверхні. Розглянемо стадію газифікації біомаси як процес термічного розкладання піролізних продуктів з окислювачем (гаряче повітря).

Швидкість реакції частки піролізного продукту:

$$\frac{dm_{\text{нір.нр}}}{d\tau} = -k_{\text{еф}} S_{\text{част}} C_{\text{нар}} \quad (2.18)$$

$m_{\text{нір.нр}}$  - маса піролізного продукту, кг;

$k_{\text{еф}}$  - ефективна стала швидкості гетерогенної реакції, м/с;

$C_{\text{пар}}$  – концентрація водяного пару, кг/м<sup>3</sup>.

Ефективна константа швидкості через кінетичні та масообмінні коефіцієнти знаходиться з виразу:

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_R k_D}{k_R + k_D} \quad (2.18)$$

$k_R$  - кінетична стала швидкості гетерогенної реакції, м/с;

$k_D$  - коефіцієнт масообміну частинки з потоком, м/с.

Кінетична стала швидкості залежить від температури згідно експоненціального закону:

$$k_R = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.19)$$

$A$  – передекспоненціальний коефіцієнт, м/с

$E$  – енергія активації, Дж/моль

Коефіцієнт масообміну частинки з потоком:

$$k_D = \frac{m_{\text{част}}}{S_{\text{част}} \tau (C_{\text{гр}} - C_{\text{см}})} \quad (2.20)$$

$C_{\text{гр}}$  – концентрація на границі поділу фазових середовищ, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{ф}}$  – концентрація в ядрі потоку фазового середовища, кг/м<sup>3</sup>.

Таким чином, зміна температури піролізних продуктів по довжині газогенератору визначається на основі сферичного тіла:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{g_{\text{потік}} (c_{\text{кокс}} \rho_{\text{кокс}} + c_{\text{пір.прод}} \rho_{\text{пір.прод}}) r_{\text{част}}^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{пір.прод}} r_{\text{част}}^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q_{\text{реак}}}{g_{\text{потік}} (c_{\text{кокс}} \rho_{\text{кокс}} + c_{\text{пір.прод}} \rho_{\text{пір.прод}})} \quad (2.21)$$

У рівнянні (2.21) перший доданок правої частини представляє зміну внутрішньої енергії за рахунок молекулярної теплопровідності, а другий – зміну внутрішньої енергії локального об'єму частинки за рахунок термічних ефектів хімічних реакцій термічного розкладання піролізних продуктів.

Коефіцієнт теплопровідності частинки піролізних продуктів:

$$\lambda_{\text{част}} = \lambda_{\text{пір.прод}} \frac{\rho_{\text{пір.прод}}}{\rho_{\text{пір.прод}}^0} + \lambda_{\text{вугл}} \frac{\rho_{\text{вугл}}}{\rho_{\text{пір.прод}}^0} \quad (2.22)$$

Зміна внутрішньої енергії локального об'єму частинки за рахунок термічних ефектів термічного розкладання піролізних продуктів:

$$\Delta Q_{\text{реак}} = \frac{\partial \rho_{\text{пір.прод}}}{\partial \tau} \Delta H_{\text{реак}} \quad (2.23)$$

Потік парогазової суміші від поверхні частинки, який характеризує термічне розкладання піролізних продуктів:

$$Q_{\text{ПГс}} = \frac{g_{\text{потік}}}{r_{\text{част}}^2} \int_0^R \frac{\partial \rho_{\text{ПГс}}}{\partial z} r_{\text{част}}^2 dr \quad (2.24)$$

Швидкість потоку газового середовища, в якому рухаються частинки піролізного продукту по довжині газогенератора:

$$g_{\text{потік}} = \frac{G_{\text{пар}} + \sum Q_{\text{ПГс}} f_{\text{част}}}{S_{\text{газиф}} \sum \rho_i} \quad (2.25)$$

Сумарний потік парогазової суміші в усіх зонах та парціальна густина продуктів термічного розкладання піролізних продуктів визначається за рахунок стану ідеального газу:

$$\sum Q_{\text{ПГс}} = \int_0^z Q_{\text{ПГс}} dz \quad (2.26)$$

$$\rho_i = \frac{M_i P}{RT} X_i \quad (2.27)$$

Диференційне рівняння температури в газогенераторі при термічному розкладанні піролізного продукту:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_{\text{ПГс}} \Delta H_{\text{реак}} f_{\text{част}}}{c_z \rho_z \mathcal{G}_{\text{потік}}} \quad (2.28)$$

Початкові умови, за рахунок умов рівномірного розподілу початкових параметрів:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{пір.прод}}(r, \tau = 0) &= \rho_{\text{пір.прод}}^0 \\ T_{\text{пір.прод}}(r, \tau = 0) &= T_{\text{пір.прод}}^0 \\ \rho_{\text{вугл}}(\tau = 0) &= 0 \\ \rho_{\text{ПГс}}(\tau = 0) &= 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Граничні умови, визначаються в центрі частинки, враховуючи симетричність:

$$\lambda_{\text{пір.прод}} \left. \frac{\partial T}{\partial r_{\text{част}}} \right|_{r_{\text{част}}=0} = 0 \quad (2.30)$$



та на поверхні за рахунок конвекції та випромінювання граничні умови 3 роду:

$$\lambda^* \frac{\partial T}{\partial r_{част}} \Big|_{r_{част}=R} = \alpha(T_c - T_{част}) + \sigma e(T_c^4 - T_{част}^4) \quad (2.31)$$

Етапи термічного розкладання частинки піролізного продукту завершується на умові, якщо потік парогазової суміші з поверхнею частинки дорівнюють нулю. Надалі відбувається газифікація коксових решток. Реакція частинки коксового залишку знаходиться з виразу:

$$\frac{g_{кокс} dm_{кокс}}{dz} = -Q_{кокс} S_{кокс} \quad (2.32)$$

Загальний час реакції коксової частинки:

$$\tau_{кокс} = \frac{1}{2M_{вугл}} \int_{d_{кокс0}}^{d_{кокс}} \frac{\rho_{кокс}}{Q_{кокс}} dd_{кокс} \quad (2.33)$$

$M_{вугл}$  – молярна маса вуглецю, кг/моль.

Для технологічних розрахунків процесу газифікації достатньо знати елементарний склад сировини.

### Висновки

1. Розроблена модель збагачення газу методом газифікації піролізних продуктів.
2. З'ясовано, що термічне розкладання піролізних продуктів всередині камери газифікації з температурою в межах 600-1000 °С.
3. В процесі газифікації спостерігається стадії нагрівання, випаровування, термічного розкладання, мікровибухи та газифікація. Тобто при 70-150 °С відбувається випаровування летких речовин та термічне розкладання органічних речовин та молекул газу. Потім

спостерігається збільшення в об'ємі газоподібних продуктів та утворення герметичної вугільної поверхні.

4. Етапи термічного розкладання частинки піролізного продукту завершується на умові, якщо потік парогазової суміші з поверхнею частинки дорівнюють нулю. Надалі відбувається газифікація коксових решток.

### **3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

З метою експериментального дослідження процесу швидкого теплопровідного піролізу та отримання піролізного продукту (газ та коксовий залишок) було спроектовано та побудовано експериментальний стенд, як показано на рисунках 3.1 та 3.2. Експериментальний стенд складається з приймального бункера 1, системи подачі сировини 2, реактора теплопровідного піролізу 3, приймача вугільного залишку 4, теплообмінника 5, приймальний бак 6 та блок керування 7. Експериментальна установка працює наступним чином: суха (вологість менше 12%) оброблена сировина надходить у живильник 2, який складається з двох секторних живильників, з герметичного приймального бункера деревної тріски 1, що забезпечує безперервність, рівномірність подачі і герметичність процесу. Потім сировина потрапляє в теплопровідний піролізний реактор 3, де відбувається піроліз, тверді частинки вугілля збираються в ресивері 4, а отримана парогазова суміш направляється в теплообмінник 5, де відбувається її конденсація. Газоподібна частина направляється в ресивер 6, де газ, що не сконденсувався, спалюється на факелі. На цій пілотній установці можна отримати до 75% газоподібного продукту.

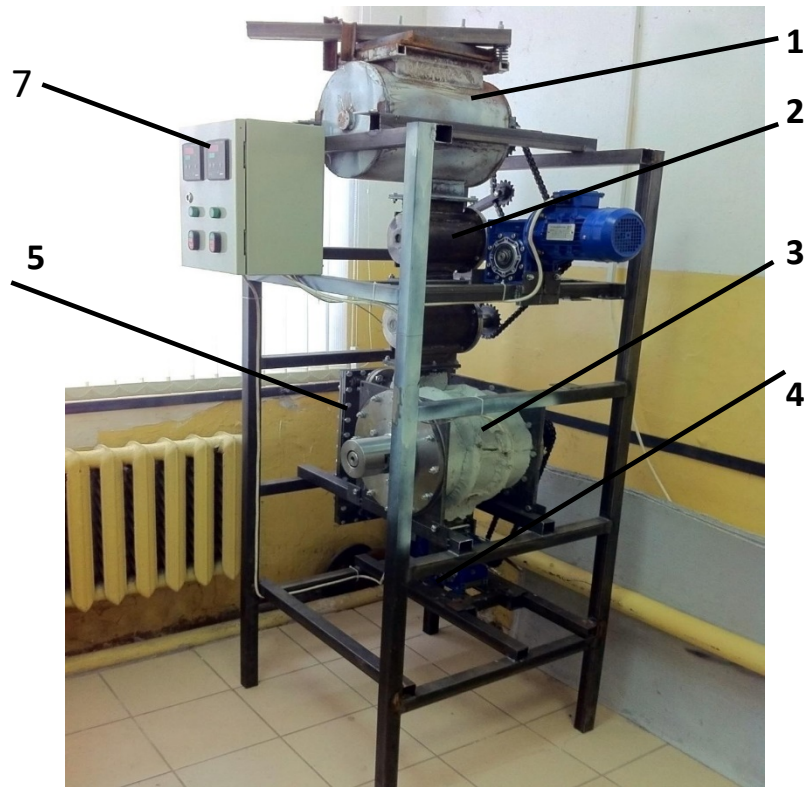


Рисунок 3.1 – Стенд для визначення теплопровідного піролізу  
деревинних відходів

1- приймальний бункер, 2 – система подачі сировини, 3 – реактор  
теплопровідного піролізу, 4 – приймач вугільного залишку, 5 –  
теплообмінник, 7 – блок управління

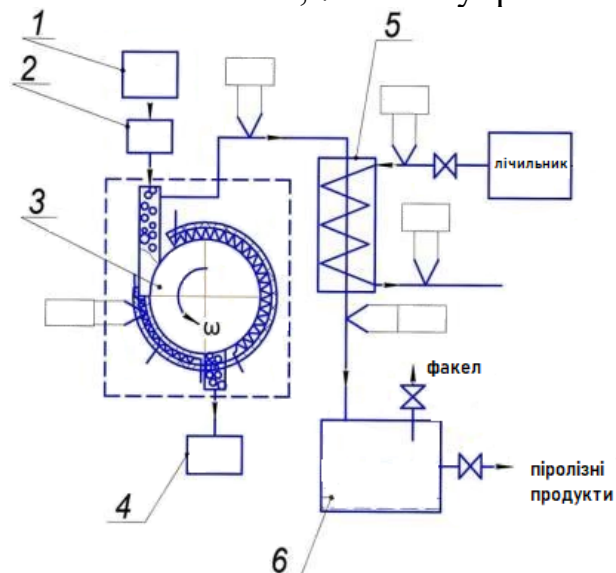


Рисунок 3.2 – Схема експериментального стенду  
2- приймальний бункер, 2 – система подачі сировини, 3 – реактор  
теплопровідного піролізу, 4 – приймач вугільного залишку, 5 –  
теплообмінник, 6 – приймальний бак, 7 – блок управління

### 3.1 Аналіз результатів досліджень

#### 3.1.1 Результати процесу теплопровідного піролізу

Проведено експериментальні та теоретичні дослідження процесу швидкого теплопровідного піролізу деревних відходів. Результати досліджень швидкого теплопровідного піролізу деревини показують, що максимальне виділення газоподібного палива досягає 75% при температурі 550 °С (рис. 3.3). При подальшому підвищенні температури процесу піролізу збільшується виділення газів, що не конденсуються.

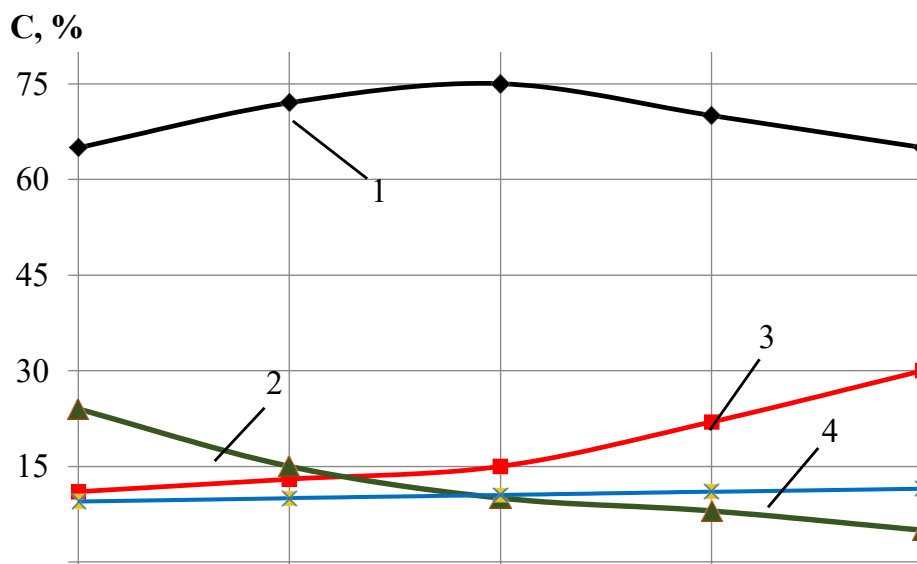


Рисунок 3.3 – Залежність виходу газу від температури (1 – піролізний газ, 2 – вуглицева частка, 3 – неконденсований газ)

Час перебування в реакційній камері є одним з ключових факторів, що впливають на виділення продуктів швидкого теплопровідного піролізу деревини. Було проведено експериментальне дослідження впливу часу перебування парогазової суміші на вихід продуктів піролізу при оптимальній температурі ( $T = 550$  °С) процесу швидкого теплопровідного піролізу (значення від 0 до 5 с).

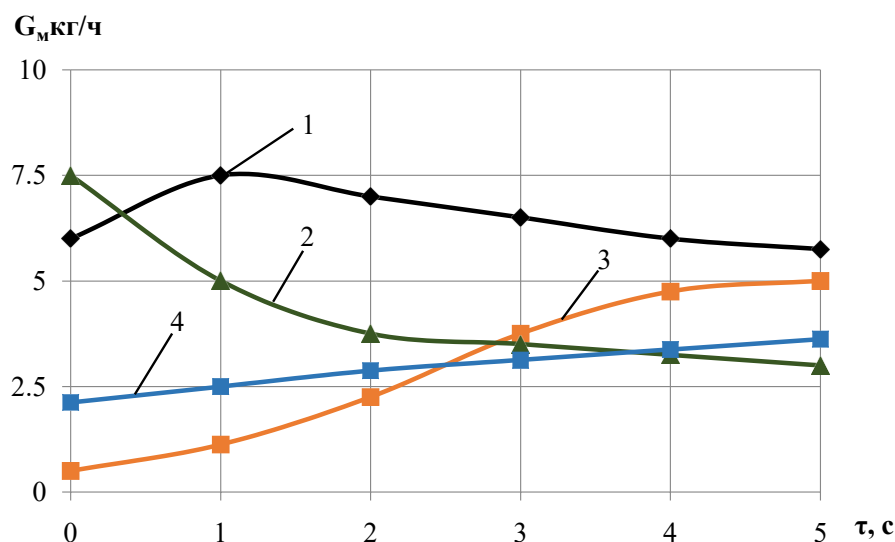


Рисунок 3.4 – Залежність витрат продуктів піролізу деревини від часу перебування парогазової суміші при  $T = 550^{\circ}\text{C}$

1 – піролізний газ, 2 – вуглицева частка, 3 – неконденсований газ, 4 – склад вологи в паливі

З рис. 3.4 видно, що виділення піролізного газу збільшується з 0,1с і досягає максимального значення через 1 секунду. Після 1 с виділення піролізного газу швидко зменшується і продовжується до кінця вимірювання (5 с) Дослідження показали, що збільшення часу перебування парогазової суміші в камері при  $550^{\circ}\text{C}$  збільшує вихід газів, що не конденсуються.

Було проведено експериментальне дослідження впливу розміру частинок (4-16 мм) на вихід продуктів процесу швидкого теплопровідного піролізу деревини (рис. 3.5). Зі збільшенням розміру частинок деревини процес теплопередачі стає складнішим, а виділення летких речовин і піролізних газів зменшується. Найвищий вихід палива (75%) досягається в діапазоні розмірів частинок від 4 мм до 10 мм. Подача частинок більшого розміру (>10 мм) призводить до неповного піролізу, збільшення виходу вугільних частинок і зменшення виходу піролізних газів.

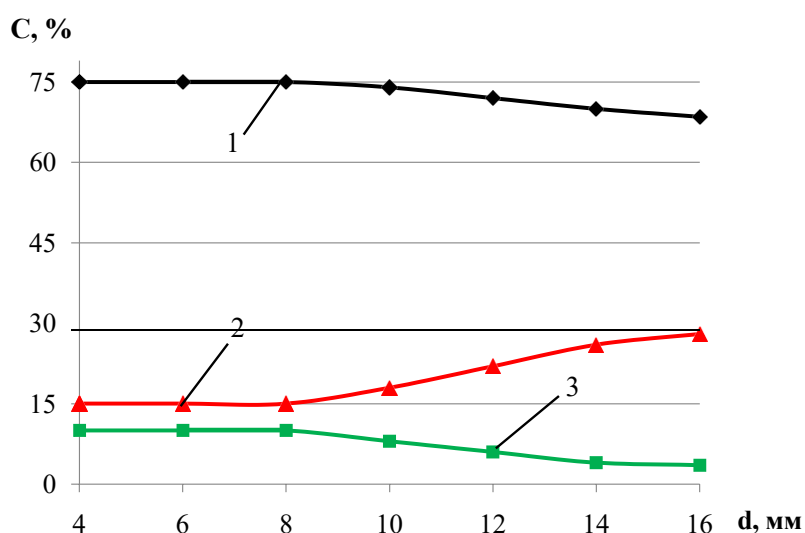


Рисунок 3.5 – Залежність продуктів піролізу від розміру часток при  $T = 550^{\circ}\text{C}$  (1 – піролізний газ, 2 – вуглицева частка, 3 – неконденсований газ)

З'ясовано діапазон виходу газоподібних продуктів з різних видів сировини (табл. 3.1)

Таблиця 3.1

Вихід газоподібних продуктів з різної біомаси

Біомаса	Вихід газоподібного продукту, мас.%	Теплота згоряння, МДж/кг
Сосна	65 – 75	19-22
Дуб	65 – 75	21-23
Папір	60 - 75	20-21
Торф	47 - 55	21-23

З таблиці зазначено, що при швидкому піролізі папіра та дуба вихід піролізного продукту досягає 75% та найбільша теплота згоряння при термічному розкладанні дуба та торфа.

### 3.1.2 Результати процесу газифікації продуктів піролізу

Експериментальне дослідження піролізу газоподібних та твердих продуктів теплопровідного піролізу деревної біомаси проводили наступним

чином: зразок (піролізні продукти) нагрівали від температури навколишнього середовища до 150°C зі швидкістю 10°C/хв і витримували при цій температурі протягом 10 хв для видалення вологи. Потім нагрівали до 600°C і витримували при цій температурі протягом 3 хв. Азот подавали зі швидкістю 150 мл/хв для видалення газоподібних і конденсованих продуктів з печі (ТГ) і мінімізації вторинного розкладання парогазової суміші. Щоб уникнути конденсації та адсорбції летких продуктів, лінію переносу і газову камеру нагрівають до 180°C. Піролізний (ТГ) аналіз піролізату проводили з наступними швидкостями.

Використовували швидкості нагрівання 5, 10 і 20 °C/хв. Зразки нагрівали окремо від температури навколишнього середовища до 600°C і реєстрували подальшу втрату ваги.

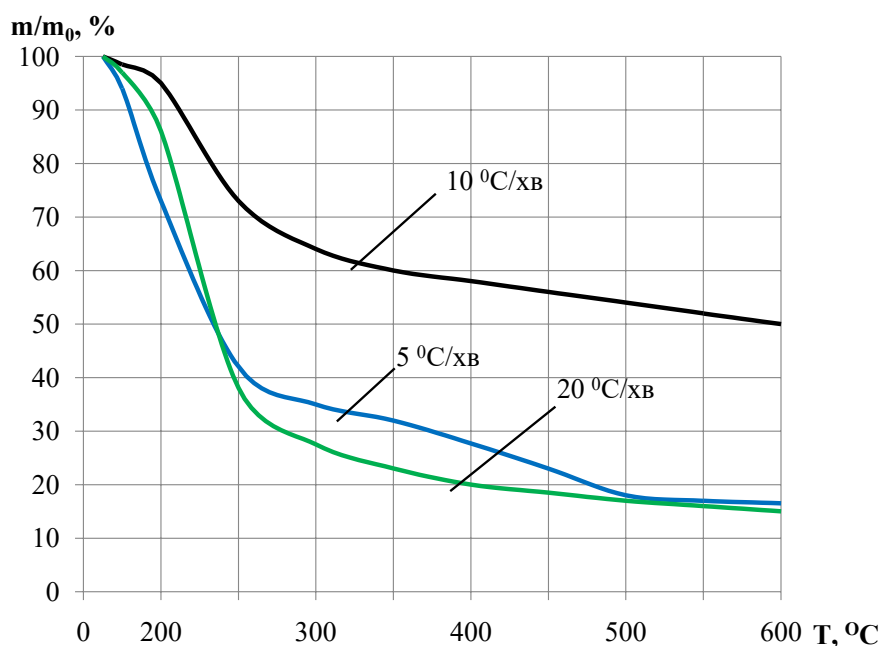


Рисунок 3.6 - Термограма

Отримані криві показують, що максимальна втрата маси відбувається в діапазоні температур 100-250°C. Подальше нагрівання до 400°C не призводить до значної втрати ваги. Зі збільшенням швидкості нагрівання пік максимальної втрати ваги зміщується в бік вищих температур, а швидкість втрати ваги зростає. Температуру нагрівання збільшують до повного завершення реакції. Криві, отримані при швидкості нагрівання 5°C/хв і 20°C/хв, суттєво не



відрізняються одна від одної. Результати, що відповідають швидкості нагрівання  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ , відрізняються від загальних результатів. Згідно з даними кінетичних параметрів, найвища питома теплота хімічної реакції піролізу піролізного газу при швидкості нагрівання  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$  є причиною цієї різниці. Втрата маси піролізних продуктів є найбільшою при швидкості нагрівання  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$  та  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ .

Було досліджено вплив швидкості нагрівання і температури на вихід вуглецевих частинок, в результаті чого були отримані дані, показані на рисунку 3.7. Експериментальні дані показують, що високий вихід вуглецевих частинок спостерігається при низьких швидкостях нагрівання. Вихід вуглецевих частинок значно зменшується (з 14,4 до 10,5 мас. %) при нагріванні зі швидкістю  $2 - 14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{сек}$  (при температурі  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При швидкостях нагріву  $2 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  вихід вуглецевих частинок становить від 11,5 до 3,8 % мас (при  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Процес регулювання високої швидкості нагріву здійснюється за допомогою одночасного перемішування крапель піролізу в реакторі і подачі палива, що охолоджується повітрям. Краплі меншого розміру випаровуються швидше і утворюють менше напівкоксу, ніж більші краплі.

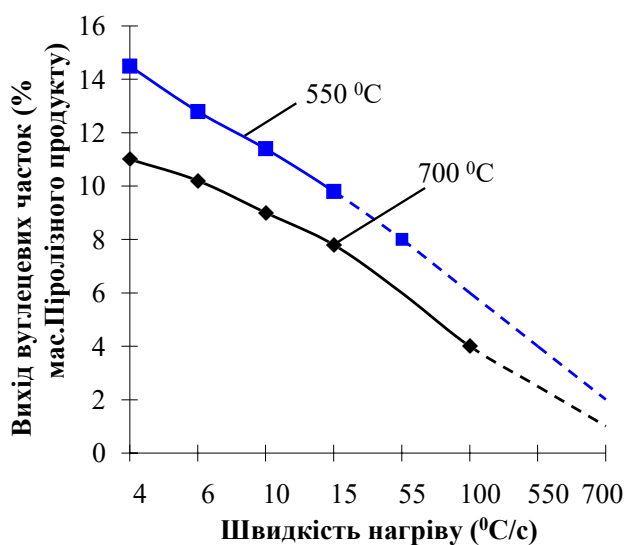


Рисунок 3.7 - Залежність виходу вуглецевих часток термічного розкладання від швидкості нагріву

Шляхом математичного моделювання було отримано ряд залежностей для характеристики гідравлічного розповсюдження піролізних часток. Залежність об'ємної витрати піролізного палива від перепаду тиску від сопла до сопла для різних діаметрів сопла, показана на рисунку 3.8, вказує на те, що об'ємна витрата піролізних продуктів зростає зі збільшенням перепаду тиску.

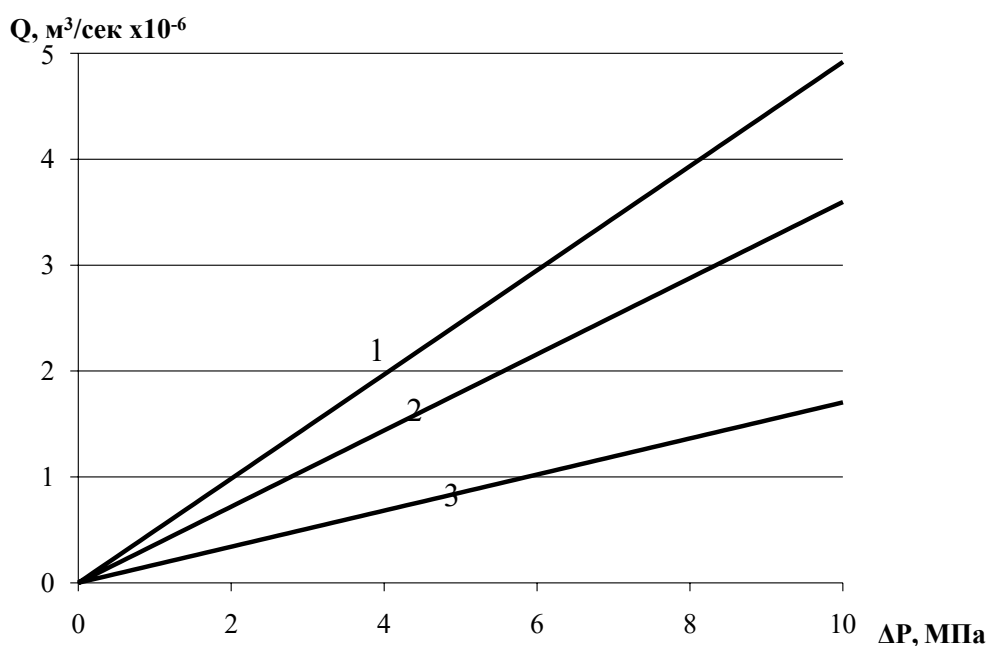


Рисунок 3.8 – Залежність об'ємної витрати піролізного продукту від перепаду тиску через сопло з різними діаметрами (1 – 2мм, 2 - 1мм, 3 - 0,5мм)

Також було оцінено середній діаметр крапель при розпиленні. Залежність середнього діаметру крапель для різних діаметрів сопла від перепаду тиску на соплі, показана на рисунку 3.9, вказує на те, що діаметр часток зменшується зі збільшенням тиску. Слід зазначити, що діаметр краплі зменшується зі збільшенням температури. Найбільш значне зменшення діаметра краплі відбувається при збільшенні перепаду тиску до 20 атм. Дані математичного моделювання вказують на те, що з технічної точки зору тиск розпилення 4-6 атм і діаметр сопла 1 мм є найбільш оптимальними параметрами для реалізації процесу газифікації. Вищі тиски вимагають більших витрат на розпилення, а піролізний продукт починає швидше старіти і її в'язкість зростає.

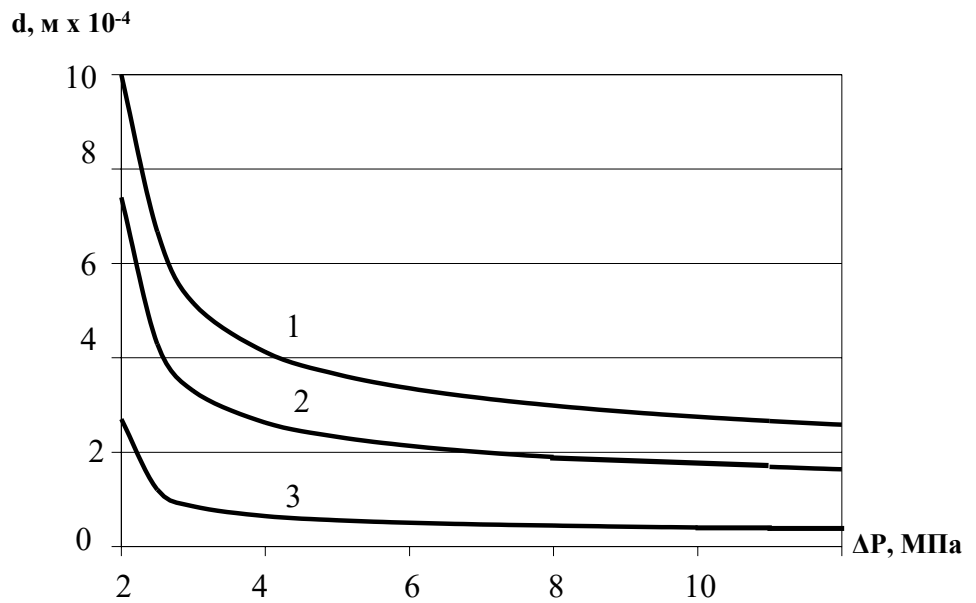


Рисунок 3.9 – Залежність діаметра часток від пререпаду тискуз різними діаметрами сопла (1 – 2мм, 2 - 1мм, 3 - 0,5мм)

### 3.2 Визначення складу та теплотворної здатності паливного газу

Були проведені експерименти на установці газифікації рідкого палива для визначення складу отриманого газу та теплового ККД газогенератора.

На рисунку 3.10. показана залежність складу продуктового газу від температури газифікації за відсутності подачі зовнішнього окислювача.

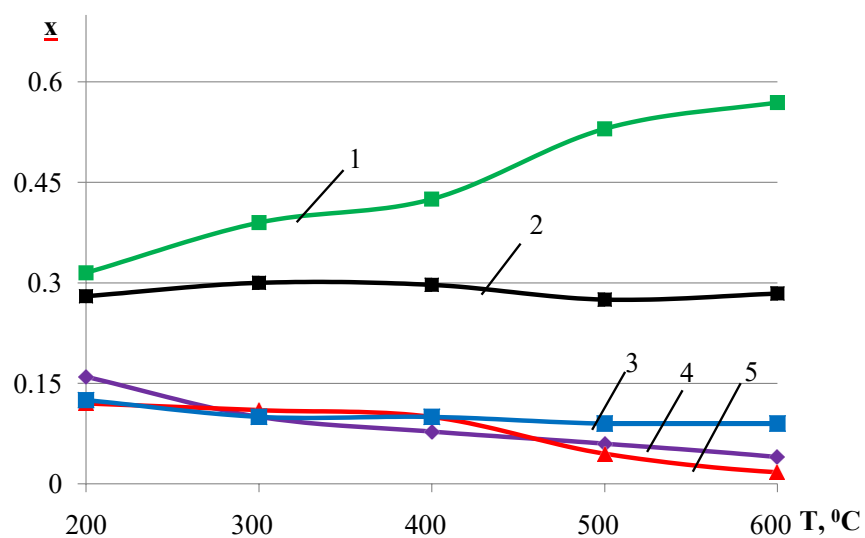


Рисунок 3.10 – Залежність паливного газу від температури газифікації (1 –

$H_2$ , 2 –  $CO$ , 3 –  $CO_2$ , 4 –  $CH_4$ , 5 –  $C_2H_2$ ).

Під час процесу піролізу  $H_2$  в основному утворюється внаслідок дегідратації хімічних сполук у піролізного газу та вторинного розкладання продуктів. Вода в гарячій піролізній рідині запускає реакцію перетворення пари, що сприяє збільшенню водню. Під час піролізу вихід  $CO$  і  $CO_2$  майже стабільний при 300-400 °С. При більш високих температурах спостерігається незначне збільшення  $CO$  паралельно зі зменшенням  $CO_2$ , що пояснюється рівновагою Будуара.

Відомо, що виділення  $CO$  під час піролізу відбувається в основному за рахунок розкладання кисневмісних функціональних груп у піролізному розчині []; максимальне виділення  $CH_4$  відбувається при 200 0С і потім зменшується з підвищенням температури; дуже невелика кількість  $CH_4$  залишається при 600 0С.

Експериментальним (з використанням калориметра) і розрахунковим методом (за рівнянням Д.І. Менделєєва) визначено залежність теплоти згоряння газу, що утворюється, від температури газифікації піролізних продуктів (рис. 3.11) без подачі зовнішнього окислювача.

$$Q_H = 0,126[CO] + 0,108[H_2] + 0,56[C_2H_2] + 0,358[CH_4]$$

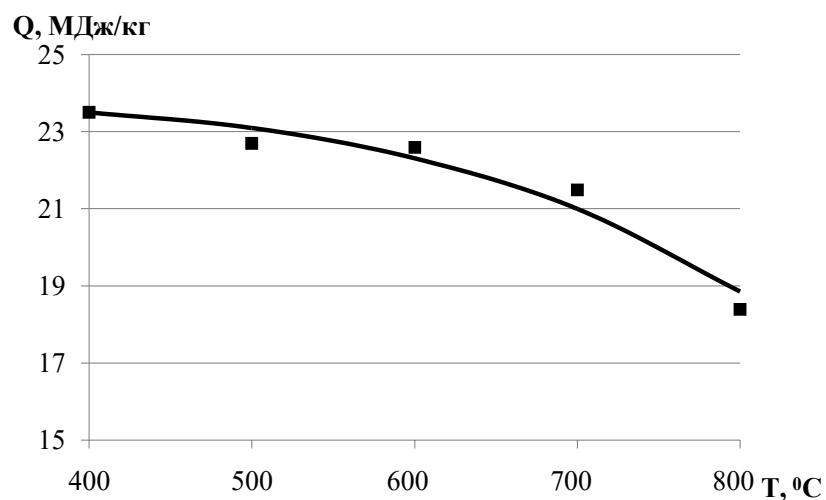


Рисунок 3.11 – Залежність теплоти згоряння паливного газу від температури газифікації

Ця залежність свідчить про те, що при газифікації піролізних продуктів (без подачі зовнішнього окислювача) виділяються гази з низькою максимальною теплотою згоряння при 400 °С, а вихід горючих газових компонентів ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  і  $\text{CO}$ ) зменшується з підвищенням температури (рис. 3.10). Проведено експериментальне дослідження впливу температури від 900 до 1300 °С на вихід компонентів генерованого газу при подачі пари як окислювача, на рис. 3.12. показано температурну залежність виходу компонентів генерованого газу в діапазоні 400-800 °С від температури газифікації. Незалежно від робочої температури до 1300 °С піролізат в основному розкладається на наступні гази:  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  і  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; при 800 °С  $\text{C}_2\text{H}_2$  не виділяється. З підвищенням температури частка  $\text{H}_2$  значно зростає за рахунок оксиду вуглецю, метану та ацетилену; при 800 °С вміст водню майже стабільний. При 800 °С мольна частка водню досягає максимального значення - 64% від мольної частки газу, що виділився. Вище 800 °С вміст оксиду вуглецю дещо зростає.

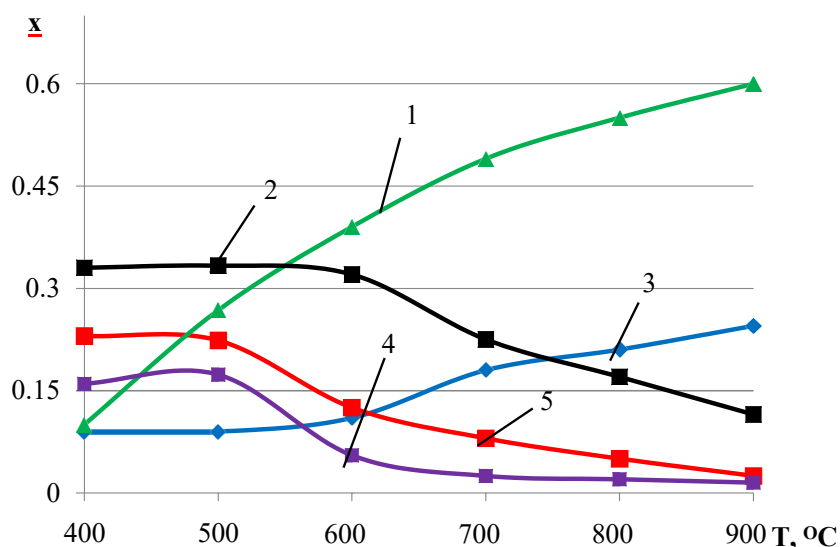


Рисунок 3.12 – Залежність складу паливного газу від температури газифікації  
(1 –  $\text{H}_2$ , 2 –  $\text{CO}$ , 3 –  $\text{CO}_2$ , 4 –  $\text{CH}_4$ , 5 –  $\text{C}_2\text{H}_2$ ).

В ході даного дослідження була отримана залежність теплоти згоряння газу, що утворився, від концентрації окислювача (газоповітряна суміш), яка наведена на рис. 3.13.

З цієї залежності видно, що теплота згоряння утвореного газу максимальна при частки 0,25. При подальшому збільшенні збагачення піропалива гарячим повітрям теплота згоряння генераторного газу зменшується.

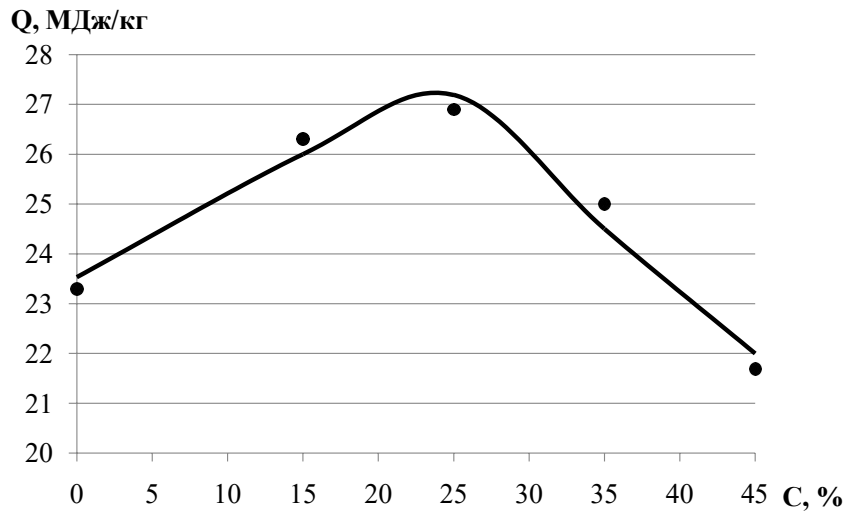


Рисунок 3.13 – Залежність теплоти згоряння паливного газу від концентрації окислювача (повітря).

Проводились дослідження впливу тиску в камері газифікації на теплоту згоряння (рис.3.14)

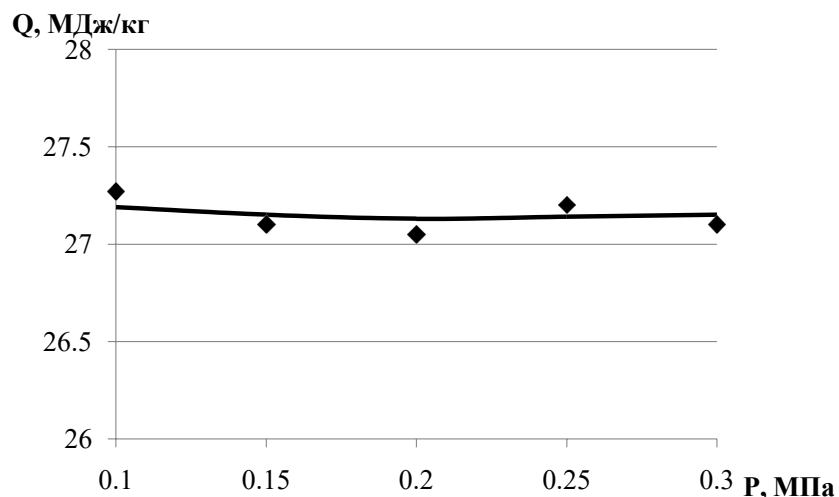


Рисунок 3.14 - Залежність теплоти згоряння від тиску в камері газифікації (до 800°C)

Зі збільшенням тиску утворення CO і H<sub>2</sub> зменшуються, але теплота згоряння паливного газу не зменшується, оскільки збільшуються виділення CH<sub>4</sub>.

За результатами експериментальних досліджень отримана залежність ефективності газифікації палива від масової витрати окислювача, яка показана на рис. 3.15. Ефективність газифікації виражається як відношення потенційної теплоти в газі (CO + H<sub>2</sub>), отриманого з 1 кг вихідного палива, до теплоти згоряння палива []:

$$\eta = \frac{Q_{\text{нал.газ}} \nu}{Q_{\text{пір.прод}}} 100\%$$

$Q_{\text{нал.газ}}$  - теплота згоряння отриманого газу, МДж/м<sup>3</sup>

$Q_{\text{пір.прод}}$  - теплота згоряння піролізних продуктів (твердих та газоподібних), МДж/м<sup>3</sup>

$\nu$  - вихід отриманого газу м<sup>3</sup>/кг

Очевидно, максимальний вихід ККД (84, 3%) досягається з витратою 1.5 кг/год окислювача (газповітряної суміші).



Рисунок 3.15 – Залежність ккд газифікації від масової витрати окислювача

Характер кривої на рис. 3.15. показує, що к.к.д. зменшується зі зменшенням витрати пари, що свідчить про недостатню повноту процесу, менший вихід газу і підвищене сажеутворення. Коли витрата пари перевищує оптимальне значення, к.к.д. процесу також знижується. У цьому випадку надлишок пари витрачається на реакцію  $H_2$  і  $CO$ , що призводить до зниження теплоти згоряння отриманого газу.

#### Висновки

1. З метою експериментального дослідження процесу швидкого теплопровідного піролізу та отримання піролізного продукту (газ та коксовий залишок) було спроектовано та побудовано експериментальний стенд.
2. Проведено експериментальні та теоретичні дослідження процесу швидкого теплопровідного піролізу деревних відходів. Результати досліджень швидкого теплопровідного піролізу деревини показують, що максимальне виділення газоподібного палива досягає 75% при температурі 550 °С.
3. Виділення піролізного газу збільшується з 0,1с і досягає максимального значення через 1 секунду. Після 1 с виділення піролізного газу швидко зменшується і продовжується до кінця вимірювання (5 с).
4. Дослідження показали, що збільшення часу перебування парогазової суміші в камері при газифікації піролізних продуктів (без подачі зовнішнього окислювача) виділяються гази з низькою максимальною теплоотою згоряння при 400 °С, а вихід горючих газових компонентів ( $CH_4$ ,  $C_2H_2$  і  $CO$ ) зменшується з підвищенням температури (рис. 3.10). досягає максимального значення - 64% від мольної частки газу, що виділився.
5. Очевидно, максимальний вихід ККД (84, 3%) досягається з витратою 1.5 кг/год окислювача (газповітряної суміші).
6. Характер кривої на рис. 3.15. показує, що к.к.д. зменшується зі зменшенням витрати пари, що свідчить про недостатню повноту



процесу, менший вихід газу і підвищене сажеутворення. Коли витрата пари перевищує оптимальне значення, к.к.д. процесу також знижується. У цьому випадку надлишок пари витрачається на реакцію  $H_2$  і  $CO$ , що призводить до зниження теплоти згоряння отриманого газу.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

### **4.1 Організація охорони праці на підприємствах**

За стан охорони праці на підприємстві відповідає директор. Відповідальність за охорону праці в рослинництві покладається на головного агронома, згідно з наказом директора, а у разі відсутності фахівця з охорони праці — на головного інженера підприємства. Згідно з Типовим положенням про навчання і перевірку знань з охорони праці, визначено порядок і види навчання для працівників та службовців з питань охорони праці.

Проводяться такі інструктажі з охорони праці та безпеки життєдіяльності:

- вступний інструктаж для нових працівників, який реєструється в журналі реєстрації вступних інструктажів з охорони праці.
- первинний інструктаж на робочому місці проводиться для всіх новоприйнятих працівників, який організовує начальник виробничої ділянки або керівник робіт для кожного працівника індивідуально.
- повторний інструктаж проводиться протягом шести місяців після первинного. Він також реєструється в журналі інструктажів з охорони праці.
- позапланові інструктажі проводяться у разі змін у виробничому процесі, введення нового обладнання або після нещасного випадку на підприємстві, а також при оновленні стандартів з охорони праці. Ці інструктажі також фіксуються в журналі реєстрації.
- цільові інструктажі організовуються, коли працівники виконують роботи з підвищеною небезпекою. Вони також реєструються в журналі, але дозволи на виконання робіт з підвищеною небезпекою не видаються.

У господарстві існує колективний договір, який включає положення щодо покращення охорони праці та техніки безпеки. Оскільки на підприємстві немає профспілки, офіційний контроль за охороною праці здійснюється представниками трудового колективу.

Стан виробничої санітарії визнано задовільним: працівники забезпечені роздягальнями, спецодягом, душовими та миючими засобами.

Усі витрати на заходи з охорони праці оплачуються господарством, працівники не несуть матеріальних витрат.

Вся робота з охорони праці в сільському господарстві здійснюється відповідно до «Положення про організацію роботи з охорони праці на підприємствах агропромислового комплексу України».

Спеціалісти з охорони праці мають право:

- забороняти роботу на техніці та обладнанні, якщо існує загроза життю або здоров'ю працівників, або є ризик аварії чи пожежі.
- відстороняти від роботи осіб, які порушують правила з охорони праці, санітарії або протипожежного захисту, і повідомляти керівництво підприємства або відповідальних осіб.
- звертатися до керівництва з пропозицією про дисциплінарну відповідальність або судове переслідування осіб, які порушують норми охорони праці.

## **4.2. Вимоги безпеки праці під час виконання робіт на опалювальних газових установках**

### **4.2.1. Загальні положення**

Природні та штучні гази є важливими енергетичними ресурсами в промисловості та побуті, тому дотримання вимог безпеки є необхідним. Газовикористовуючі установки, що забезпечують подачу, регулювання та облік газу, є об'єктами підвищеної небезпеки і вимагають особливої уваги під час експлуатації.

Для введення в експлуатацію систем газопостачання населених пунктів, громадських будівель, промислових та сільськогосподарських підприємств, котелень і комунальних підприємств необхідно мати акт приймання об'єкта в

експлуатацію, технічний план газопостачальної системи та обладнання, інструкції з безпечного користування газом, план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій, а також паспорт безпеки. Також, у разі потреби, повинні бути надані документи, що підтверджують навчання та перевірку знань персоналу і робітників.

#### **4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком робіт**

Якщо на підприємстві є газова служба, то введення в експлуатацію (пуск газу) нових газових приладів виконує газова служба підприємства.

Підприємство повинно повідомити УГГ про дату пуску газу щонайменше за п'ять днів до початку робіт.

Однак, оскільки підприємство не має газової служби, пуск газу здійснюється професійною службою СПГП на підставі договору, укладеного в установленому порядку.

Власник підприємства несе відповідальність за забезпечення виконання заходів.

До експлуатації газових приладів, газопроводів і газового обладнання допускаються особи, які досягли 18 років, пройшли медичний огляд, навчання та склали відповідні іспити.

#### **4.2.3 Вимоги безпеки праці під час виконання робіт**

Працівники, які обслуговують газове обладнання, повинні проходити чергову перевірку знань безпечних методів роботи один раз на рік, а інженерно-технічні та кваліфіковані працівники - один раз на три роки.

Приміщення з газовими установками обладнуються спеціальними автоматичними звуковими і світловими покажчиками або сигналізацією, припливно-витяжними системами і системами аварійної вентиляції для попередження про витік газу.

Забороняється проводити роботи в приміщеннях, де розміщені газові установки:

- Влаштувати тимчасові електромережі або електропроводку на легкозаймистих основах.

Експлуатувати механічно пошкоджені електроприлади.

Експлуатувати механічно пошкоджені електроприлади;

- Захаращення проїзду до пожежної техніки;
- Куріння, використання легкозаймистих рідин;
- Проведення вогневих, зварювальних та інших робіт без спеціального дозволу.

Проведення вогневих, зварювальних та інших робіт без спеціального дозволу;

- Увімкнення лабораторного або електрообладнання без дозволу викладача;

- Захаращення шляхів евакуації або аварійних виходів.

#### **4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях**

Всі несправності в роботі газових установок повинні усуватися тільки після припинення подачі газу. Робоча зона повинна бути огорожена і захищена. Роботи в газонебезпечних зонах повинні виконуватися щонайменше двома працівниками в протигазах, а в газових колодязях і шурфах - також із застосуванням захисних засобів.

У приміщеннях, де розташовані газові установки, повинні бути вогнегасники, ящики з піском і пожежні щити.

Меблі та обладнання повинні бути розташовані так, щоб до евакуаційних виходів залишалися вільні проходи (шириною не менше 1 м). Евакуаційні шляхи та виходи повинні бути завжди вільними та не захищеними.

У разі виникнення надзвичайної ситуації або пожежі необхідно негайно повідомити про це пожежну охорону наступним чином

- Викликати пожежну команду за телефоном 101, вказавши адресу, номер поверху, місце пожежі, наявність людей та своє прізвище, а також, за необхідності, викликати аварійну службу газового господарства за телефоном 104;

- Евакуюйте людей та матеріальні цінності;

- Повідомте керівника та чергового (якщо такий є) про те, що сталася пожежа.

- За необхідності відключити колектор і вентиляційні системи;

- Приступити до гасіння пожежі за допомогою наявних первинних засобів пожежогасіння;

- Викликати пожежну команду для надання порад щодо гасіння пожежі та іншої допомоги.

#### **4.2.5 Вимоги безпеки праці після завершення робіт**

Завершення пуску газу повинно бути зафіксовано в наряді на виконання газонебезпечних робіт, який передається відповідальному за приміщення і зберігається разом з технічною документацією.

Відповідальний за пожежну безпеку на об'єкті після

Після завершення робіт особа, відповідальна за пожежну безпеку на об'єкті, повинна

- оглянути приміщення, щоб переконатися у відсутності порушень, які можуть призвести до пожежі

Переконатися у відсутності порушень, які можуть призвести до пожежі;

- Відключити електроживлення електроприладів та обладнання.

(крім електроустановок.

виключаються).

Висновки.

Для покращення умов охорони праці слід врахувати наступні положення

- Вимагати своєчасного проведення та реєстрації всіх повторних, позапланових та цільових інструктажів;

- Забезпечення працівників необхідними засобами індивідуального захисту та спецодягом;

- Допускати до роботи тільки технічно справні машини та інструменти, які повністю відповідають вимогам безпеки.

- Забезпечити працівників інструкціями з охорони праці відповідно до виду виконуваної роботи;

- не допускати виконання робіт несправними інструментами; і

- своєчасно проводити навчання та підвищення кваліфікації з питань охорони праці.

Також проводьте повторне навчання з охорони праці.

- Підтримуйте в актуальному стані сертифікати з охорони праці.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗУ

Для того, щоб оцінити економічну та екологічну доцільність використання нетрадиційних відновлюваних джерел енергії, ми розраховали доступність паливного газу.

Технологія піролізу забезпечує вихід газу  $V = 4 \text{ м}^3/\text{год}$ . Для підтримання температури та підвищення теплотворної здатності необхідно споживати 10 відсотків від загального обсягу виробленого газу.

Таким чином, кількість біогазу, що використовується як джерело тепла, є наступною.:

$$V_{on} = V - 0,1V = 4 - 0,4 \quad (5.1)$$

$$V_{on} = 3,6 \text{ м}^3 / \text{год} = 96 \text{ м}^3 / \text{добу} \quad (5.2)$$

Враховуючи, що нижча теплота згоряння становить  $18 \text{ МДж}/\text{м}^3$ , знайдіть кількість теплоти, яку можна отримати при спалюванні газу:

$$Q_{on} = V_{on} \cdot Q_n \quad (5.3)$$

$$Q_{on} = 1555,2 \text{ МДж} / \text{м}^3$$

Якщо ми перетворимо цю кількість теплової енергії в кВт-год, припускаючи, що  $1 \text{ кВт} = 3,6 \text{ Мдж}$ , то отримаємо:

$$W_6 = Q_{on}/3,6 \quad (5.4)$$

$$W_6 = 432 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Якщо підрахувати, що підприємство споживає  $w=180 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ , то це становить 41,6% від потужності газу, що виробляється установкою:



$$\varphi = (W / W_0)100 = 41,6 \% \quad (5.5)$$

Потужність виробленого біогазу в 2,4 рази перевищить добову потребу ферми в електроенергії:

$$W_0 / W = 2,4 \text{ рази}$$

Економічна ефективність використання відновлюваних джерел енергії, тобто паливного газу з відходів рослинництва, замість традиційних джерел енергії, визначається за такою формулою:

$$E_{\text{екон}} = Z_m \cdot B - E_{\text{ен}} \cdot K + I + E_n \cdot K_{\text{доб}} \cdot B, \quad (5.6)$$

$Z_m$  – вартість палива, грн./ т;

$B$  – річна економія палива, т;

$E_{\text{ен}}$  – нормативний коефіцієнт, рівний 0,15;

$K$  – капітальні витрати на систему використання НПДЕ, грн.;

$K_{\text{доб}}$  – питомі капітальні вкладення в приріст добування палива, грн./ т;

$I$  – сумарні експлуатаційні витрати, грн.

У загальному випадку річний економічний ефект від використання нетрадиційних відновлюваних джерел енергії розраховується з урахуванням заощаджених витрат на заходи щодо охорони навколишнього середовища (Еекол), які потрібні при використанні органічного палива, а також витрат на транспортування, зберігання палива та оплати праці (Есоц) у порівнянні з традиційним паливом.

У такому разі економічний ефект слід визначити з виразу:

$$E_{\text{НПДЕ}} = E_{\text{екон}} + E_{\text{екол}} + E_{\text{соц}} \quad (5.8)$$

Обчислемо термін окупності використання ВДЕ за формулою:

$$T_{\text{НПДЕ}} = K / E_{\text{НПДЕ}} \quad (5.9)$$

Якщо термін окупності становить менше 5 років, варіант використання ВДЕ в системі тепlopостачання вважається економічно обґрунтованим.

Для визначення річного вироблення теплової енергії використовуйте установку з виробництва біопалива:

$$Q_{\text{річ}} = 0,55 \varphi W \cdot T_{\text{оп}} \cdot T, \quad (5.10)$$

де  $T_{\text{оп}}$  – тривалість споживання палива, дні (тривалість можна порівняти наприклад до опалювального сезону);  
 $T$  – тривалість доби, год.

$$Q_{\text{річ}} = 0,55 \cdot 0,416 \cdot 180 \cdot 205 \cdot 24 = 202625,28 = 0,2 \text{ МВт} \cdot \text{год}.$$

Економія газу визначається за формулою:

$$B = Q_{\text{річ}} / Q_{\text{н}}^{\text{p}} \quad (5.11)$$

$$B = 21176 \text{ м}^3$$

де  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  – нижча теплота згоряння природного газу 35 МДж / м<sup>3</sup>

Ми визначаємо капітальні витрати на установку і придбання обладнання, необхідного для її монтажу. Якщо вартість 1 кВт настановної потужності установки NPDE становить 1600 грн.

$$K = 0,416 \cdot W \cdot \Pi_{\text{в.п.}} \quad (5.12)$$

$$K = 0,416 \cdot 180 \cdot 1600 = 119808 \text{ грн}$$

де  $\Pi_{\text{в.п.}}$  – вартість 1 кВт встановленої потужності НПДЕ, грн.

В даний час вартість 1000 м<sup>3</sup> газу для виробничих і управлінських об'єктів становить 6990 грн. Враховуючи ці дані, визначте вартість запасеного природного газу за формулою:

$$E_{\text{НПДЕ}} = (B \cdot C_{\text{газ}}) / 1000 = 148020 \text{ грн}, \quad (5.13)$$

За наступною формулою обчислемо термін окупності обладнання з отримання паливного газу (біогазу):

$$T_{\text{НПДЕ}} = 89856 / 82978,156 = 0,81 \text{ рік} = 9,6 \text{ місяців}$$

Результати розрахунків наведені в таблиці додатку 1

### **Висновки**

1. Для господарства, яке споживає 180 кВт год, визначено відповідно складає 41,6 % від потужності виробленого біогазу, це в свою чергу, в 2,4 рази більше ніж добова потреба в електроенергії.
2. Вартість газу, який зекономили, складає 119808 грн, що є вагомим показником для підприємства.
3. Термін окупності для установки з виробництва паливного газу є 9,6 місяців.
4. Отже, проведені розрахунки підтвердили доцільність використання установки.

## ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз способів термічної переробки рослинної біомаси з метою отримання паливного газу.
2. Паливо, отримане за технологією швидкого термокондуктивного піролізу, придатне для прямого спалювання в котлах, замінюючи традиційні види палива. Вирішенням проблеми є газифікація піролізної рідини, що дає змогу отримати паливо з більшою теплотворною здатністю.
3. Розроблена модель збагачення газу методом газифікації піролізних продуктів. З'ясовано, що термічне розкладання піролізних продуктів всередині камери газифікації з температурою в межах 600-1000 °С.
4. При 70-150 °С відбувається випаровування летких речовин та термічне розкладання органічних речовин та молекул газу. Потім спостерігається збільшення в об'ємі газоподібних продуктів та утворення герметичної вугільної поверхні.
5. Проведено експериментальні та теоретичні дослідження процесу швидкого теплопровідного піролізу деревних відходів. Результати досліджень швидкого теплопровідного піролізу деревини показують, що максимальне виділення газоподібного палива досягає 75% при температурі 550 °С.
6. Виділення піролізного газу збільшується з 0,1с і досягає максимального значення через 1 секунду. Після 1 с виділення піролізного газу швидко зменшується і продовжується до кінця вимірювання (5 с).
7. Дослідження показали, що збільшення часу перебування парогазової суміші в камері при газифікації піролізних продуктів (без подачі зовнішнього окислювача) виділяються гази з низькою максимальною теплотою згоряння при 400 °С, а вихід горючих газових компонентів ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  і  $\text{CO}$ ) зменшується з підвищенням температури (рис. 3.10). досягає максимального значення - 64% від мольної частки газу, що виділився.
8. Очевидно, максимальний вихід ККД (84, 3%) досягається з витратою 1.5 кг/год окислювача (газповітряної суміші).

9. Характер кривої на рис. 3.15. показує, що к.к.д. зменшується зі зменшенням витрати пари, що свідчить про недостатню повноту процесу, менший вихід газу і підвищене сажеутворення. Коли витрата пари перевищує оптимальне значення, к.к.д. процесу також знижується. У цьому випадку надлишок пари витрачається на реакцію  $H_2$  і  $CO$ , що призводить до зниження теплоти згоряння отриманого газу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ващенко В.І., Похиленко О.М. "Технології термічної переробки біомаси: піроліз, газифікація, спалювання" // Енергетика та екологія. – 2020. – №3. – С. 45–52.
2. Білоус С.В., Кравченко М.О. "Газифікація твердих побутових відходів: перспективи для України" // Відновлювана енергетика. – 2019. – №2. – С. 25–33.
3. Balat M., Kırtay E. "Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects" // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35, Issue 14. – P. 7416–7426.
4. Basu P. "Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory". – Elsevier, 2018. – 548 p.
5. Bridgwater A.V. "Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids" // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2012. – Vol. 51. – P. 3–22.
6. Demirbaş A. "Sustainable biofuels from biomass materials" // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2009. – Vol. 31, Issue 13. – P. 1200–1208.
7. Комаров В.В., Смирнов Д.М. "Піроліз деревини як ефективний метод отримання енергоресурсів" // Альтернативна енергетика і екологія. – 2021. – №6. – С. 12–20.
8. García L., Salvador M.L., Arauzo J. "Influence of operating conditions on the devolatilization of wood and its relationship with char gasification kinetics" // Fuel. – 2013. – Vol. 82, Issue 11. – P. 1291–1301.
9. Іванов С.В., Коваленко О.М. "Перспективи впровадження піролізних установок у сільськогосподарських підприємствах" // Економіка та енергетика агропромислового комплексу. – 2020. – №4. – С. 33–39.
10. Meier D., Faix O. "State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials" // Biomass and Bioenergy. – 2013. – Vol. 20, Issue 3. – P. 131–145.

- 11.Петренко О.О., Сидоренко Л.В. "Технологічні аспекти газифікації біомаси в умовах енергодефіциту" // Технічна енергетика. – 2021. – №2. – С. 41–47.
12. Qian J., Zhou Y., Zhang J. "Development and application of biomass pyrolysis technologies in China" // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 12, Issue 5. – P. 70–90.
- 13.Тарасенко Л.П., Ковальчук А.М. "Хімічний склад і енергетична цінність рослинної біомаси" // Агроекологія та природокористування. – 2019. – №2. – С. 33–41.
14. McKendry P. "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass" // Bioresource Technology. – 2002. – Vol. 83, Issue 1. – P. 37–46.
15. Basu P. "Biomass characteristics" // Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction. – Elsevier, 2018. – P. 41–62.
16. Bridgwater A.V. "The technical and economic feasibility of biomass conversion to energy" // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 15, Issue 5. – P. 2125–2156.
17. Кириленко В.І., Савченко О.М. "Роль фізико-хімічних властивостей рослинної біомаси у виробництві енергії" // Енергетика та навколишнє середовище. – 2021. – №4. – С. 19–27.
18. Raveendran K., Ganesh A., Khilar K.C. "Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components" // Fuel. – 1996. – Vol. 75, Issue 8. – P. 987–998.
19. Іванов О.О., Коваленко Н.В. "Енергетичний потенціал і склад рослинної біомаси: екологічний аспект" // Наукові праці аграрних університетів. – 2020. – №7. – С. 41–49.
20. Sluiter A., Hames B., Ruiz R. "Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass" // Laboratory Analytical Procedure (LAP). – NREL, 2012.
21. Ткаченко Ю.В., Бойко С.М. "Дослідження фізико-механічних властивостей біомаси для потреб біоенергетики" // Агробіоенергетика. – 2019. – №1. – С. 50–57.

22. Van Soest P.J. "Nutritional ecology of the ruminant: The composition of forages and their chemistries" – Cornell University Press, 2018.

23. Воронович О.В., Лисенко Т.М. "Біомаса: сировина для енергетичних технологій" // Технічні науки: сучасні досягнення. – 2020. – №8. – С. 12–20.



## ДОДАТОК 1

Техніко-економічні показники ефективності використання установки  
виробництва паливного газу.

Показники	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Кількість отриманого газу	V	м <sup>3</sup> /добу	96
Витрата біогазу для підвищення теплої здатності	0,1 V	м <sup>3</sup> /добу	9,6
Енергетична цінність отриманого газу	Q <sub>от</sub>	МДж/м <sup>3</sup>	1555,2
Середньодобове споживання електроенергії	W	<del>кВт</del> год/добу	180
Процентна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	φ	%	41,6
Кількісна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	W <sub>б</sub> / W	раз	2,4
Річне виробництво теплової енергії установкою	Q <sub>річ</sub>	МВт год	0,2
Тривалість споживання палива, дні (тривалість можна порівняти наприклад до опалювального сезону)	T <sub>оп</sub>	днів	205
Капіталовкладення	K	грн	148020
Економія природного газу	B	м <sup>3</sup>	21176
Ціна 1000 м <sup>3</sup>	<del>Ц<sub>газ</sub></del>	грн	6990
Вартість зекономленого газу	E <sub>нцде</sub>	грн	119808
Термін окупності	T <sub>нцде</sub>	міс	9,6

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО -ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно -технологічний факультет  
Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

**ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ  
В ПАЛИВНИЙ ГАЗ**

Демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня “Магістр”

---

**Виконав:** студент 2 курсу групи МгАІ-23

Дорошук Ярослав Володимирович

**Керівник:** к.т.н., доцент

Золотовська Олена Володимирівна

---

**Мета роботи** – обґрунтування процесу переробки деревинної біомаси з подальшої газифікацією з підвищенням його теплотворної здатності

---

**Предмет дослідження** – закономірності отримання багатокалорійного газу

**Об’єкт дослідження** – пристрій газифікації

---

# Аналіз існуючих схем отримання паливного газу

Схема реактора піролізу з одним циркулюючим кипящим шаром

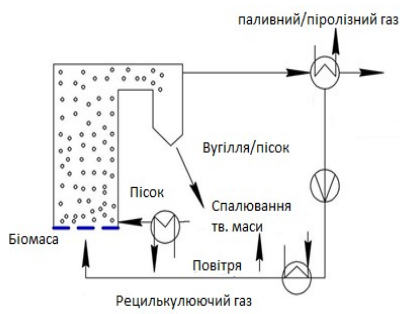


Схема абляційного пластинчастого реактора

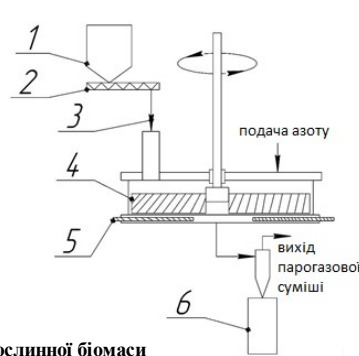
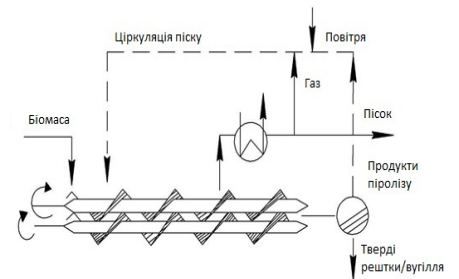


Схема реактора піролізу зі шнеком



Вакуумна камера піролізу рослинної біомаси

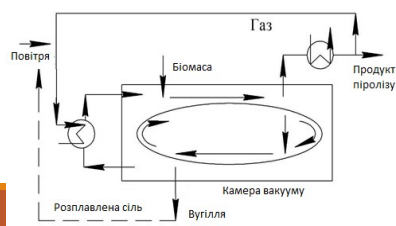
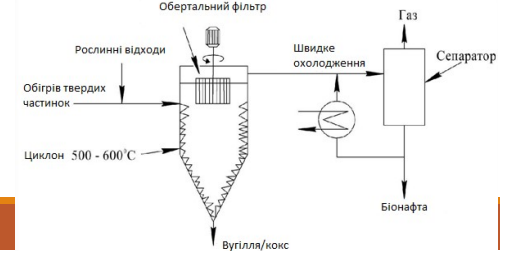


Схема циклонної камери піролізу



## Удосконалення технології отримання біопалива

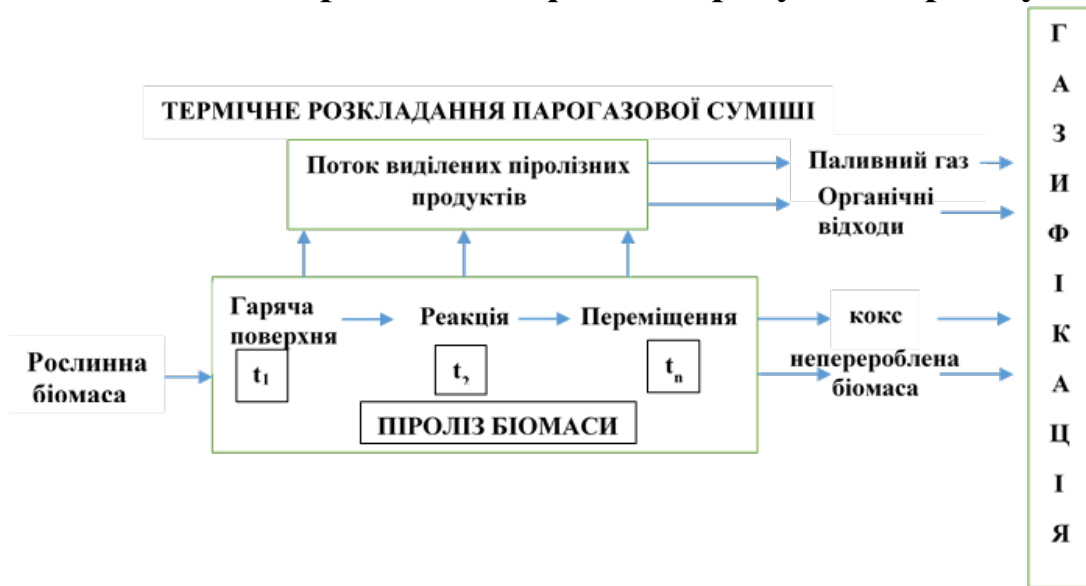
1 стадія



2 стадія



# Модель процесу газифікації продуктів піролізу



## Модель процесу газифікації продуктів піролізу

1 – зона смолоскип, 2 – зона циркуляції потоків виділеного газу, 3 – зона завершення реакцій.



Зміна температури піролізних продуктів по довжині газогенератору визначається на основі сферичного тіла:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{g_{\text{потік}} (c_{\text{кокс}} \rho_{\text{кокс}} + c_{\text{пір.прод}} \rho_{\text{пір.прод}}) r_{\text{част}}^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{пір.прод}} r_{\text{част}}^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q_{\text{реак}}}{g_{\text{потік}} (c_{\text{кокс}} \rho_{\text{кокс}} + c_{\text{пір.прод}} \rho_{\text{пір.прод}})}$$

Початкові умови, за рахунок умов рівномірного розподілу початкових параметри:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{пір.прод}}(r, \tau = 0) &= \rho_{\text{пір.прод}}^0 \\ T_{\text{пір.прод}}(r, \tau = 0) &= T_{\text{пір.прод}}^0 \\ \rho_{\text{суцл}}(\tau = 0) &= 0 \\ \rho_{\text{ПГс}}(\tau = 0) &= 0 \end{aligned}$$

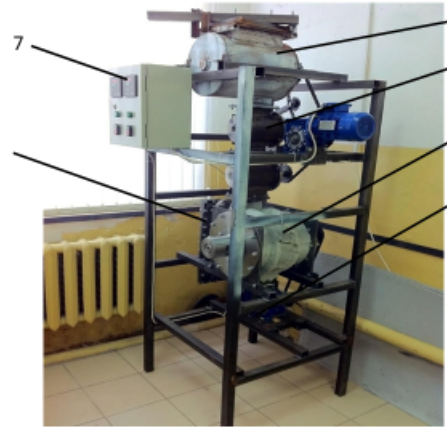
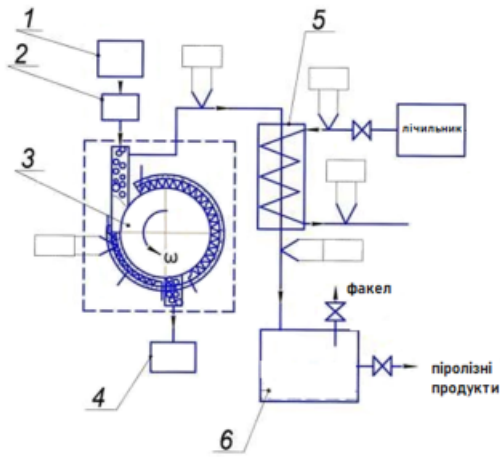
Граничні умови, визначаються в центрі частинки, враховуючи симетричність

$$\lambda_{\text{пір.прод}} \frac{\partial T}{\partial r_{\text{част}}} \Big|_{r_{\text{част}}=0} = 0$$

та на поверхні за рахунок конвекції та випромінювання граничні умови 3 роду:

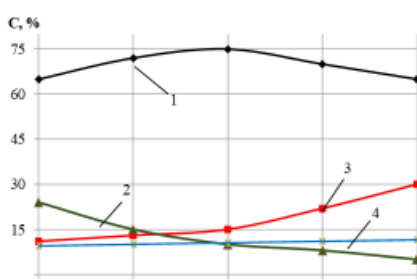
$$\lambda^* \frac{\partial T}{\partial r_{\text{част}}} \Big|_{r_{\text{част}}=R} = \alpha(T_z - T_{\text{част}}) + \sigma \epsilon (T_z^4 - T_{\text{част}}^4)$$

## Стенд для визначення теплопровідного піролізу деревинних відходів

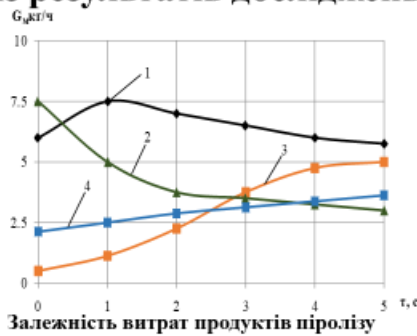


1. приймальний бункер, 2 – система подачі сировини, 3 – реактор теплопровідного піролізу, 4 – приймач вугільного залишку, 5 – теплообмінник, 7 – блок управління

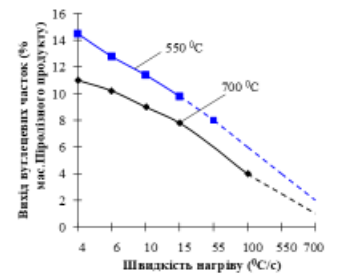
## Аналіз результатів досліджень



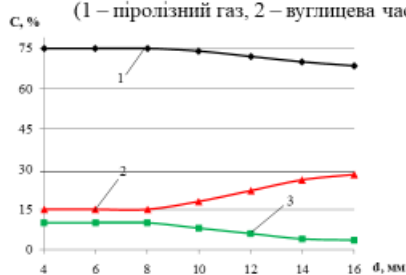
Залежність виходу газу від температури



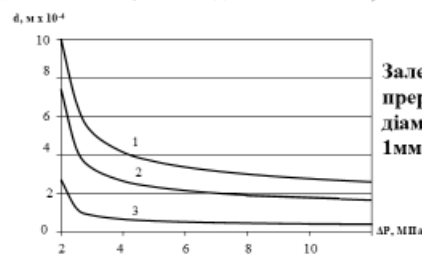
Залежність витрат продуктів піролізу деревини від часу перебування парогазової суміші при T = 550°C



Залежність виходу вуглецевих часток термічного розкладання від швидкості нагріву

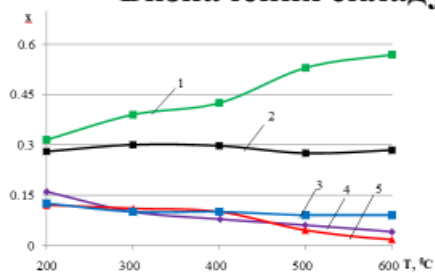


Залежність продуктів піролізу від розміру часток при T = 550°C

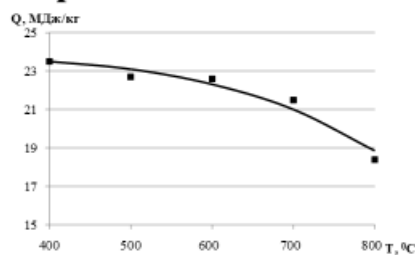


Залежність діаметра часток від прерпаду тискуз різними діаметрами сопла (1 – 2мм, 2 – 1мм, 3 – 0,5мм)

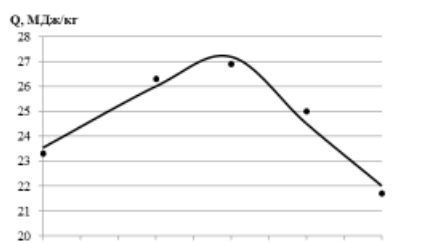
## Визначення складу та теплотворної здатності паливного газу



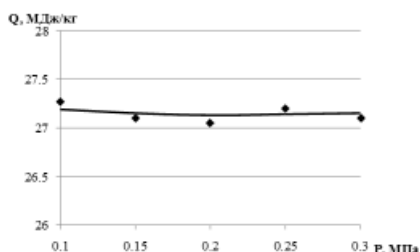
Залежність паливного газу від температури газифікації (1 – H<sub>2</sub>, 2 – CO, 3 – CO<sub>2</sub>, 4 – CH<sub>4</sub>, 5 – C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>).



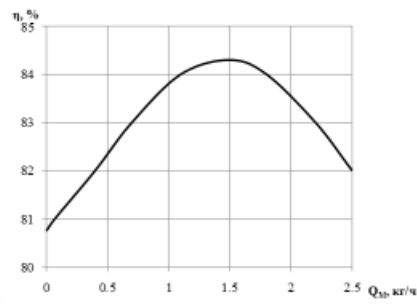
Залежність теплоти згоряння паливного від температури газифікації



Залежність теплоти згоряння паливного газу від концентрації окислювача (повітря).



Залежність теплоти згоряння від тиску в камері газифікації (до 800°C)



Залежність ккд газифікації від масової витрати окислювача

## Техніко-економічні показники ефективності використання установки

Показники	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Кількість отриманого газу	V	м <sup>3</sup> /добу	96
Витрата біогазу для підвищення теплої здатності	0,1 V	м <sup>3</sup> /добу	9,6
Енергетична цінність отриманого газу	Q <sub>оп</sub>	МДж/м <sup>3</sup>	1555,2
Середньодобове споживання електроенергії	W	кВт·год/добу	180
Процентна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	φ	%	41,6
Кількісна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	W <sub>б</sub> /W	раз	2,4
Річне виробництво теплової енергії установкою	Q <sub>річ</sub>	МВт год	0,2
Тривалість споживання палива, дні (тривалість можна порівняти наприклад до опалювального сезону)	T <sub>оп</sub>	днів	205
Капіталовкладення	K	грн	148020
Економія природного газу	B	м <sup>3</sup>	21176
Ціна 1000 м <sup>3</sup>	Ц <sub>нг</sub>	грн	6990
Вартість зекономленого газу	E <sub>нпде</sub>	грн	119808
Термін окупності	T <sub>нпде</sub>	міс	9,6