

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет конструювання і дизайну**

УДК 662.76

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету конструювання і дизайну

(підпис) Зіновій РУЖИЛО
(ПІБ)

“ ___ ” квітня 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені М. П. Момотенка
(назва кафедри)

(підпис) Іван РОГОВСЬКИЙ
(ПІБ)

“ ___ ” квітня 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Обґрунтування параметрів установки для піролізу рослинної біомаси

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма: «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, професор

(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

Кандидат технічних наук, доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Наталія ЦИВЕНКОВА

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Дмитро БОРОДІЙ

(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет конструювання і дизайну**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри технічного сервісу та
інженерного менеджменту ім. М. П. Момотенка**

д.т.н., професор _____ Іван РОГОВСЬКИЙ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ _____ ” квітня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Бородію Дмитру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма: «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Обґрунтування параметрів установки для піролізу рослинної біомаси

затверджена наказом ректора НУБіП України від “29” грудня 2023 р. № 2399 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 01 квітня 2025 року
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: наукові роботи в галузі піролізу біомаси, перелік рослинної біомаси для виробництва горючого газу і біовугілля, конструкційні параметри установок для піролізу біомаси, технологічні процеси термічної переробки рослинної біомаси, техніко-економічні та екологічні показники роботи установок піролізного розкладання біомаси, фізико-хімічні показники горючих газів та біовугілля, вироблених з різних видів рослинної біомаси.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Теоретичні основи технологічного процесу термічного розкладання рослинної біомаси в установках піролізу;
2. Розробка математичної моделі процесу піролізу рослинної біомаси;
3. Методика проведення та результати експериментального дослідження процесу піролізу рослинної біомаси.

Перелік графічного матеріалу (за потреби): схеми установок для піролізу рослинної біомаси, графіки та ілюстративні матеріали за результатами дослідження процесу пірогенетичного розкладання рослинної біомаси в піролізній установці з метою виробництва горючого газу та біовугілля.

Дата видачі завдання “30” грудня 2023 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Наталія ЦИВЕНКОВА

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

Дмитро БОРОДІЙ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ УСТАНОВОК ДЛЯ ПІРОЛІЗУ АГРАРНОЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ.....	12
1.1. Сучасні технології та конструкції установок для піролізу рослинної біомаси.....	12
1.2. Теоретичні основи процесу піролізу біомаси	26
1.3. Математичні залежності для розрахунку процесу піролітичного розкладання рослинної біомаси.....	30
1.4. Фізичні та теплотворні властивості рослинної біомаси та біовугілля.....	31
1.5. Висновки до розділу 1.....	33
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ АГРАРНОЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ.....	34
2.1. Фізико-хімічні основи процесу піролізу рослинної біомаси...	34
2.2. Методика розрахунку параметрів установки для піролізу рослинної біомаси.....	35
2.3. Розробка алгоритму розрахунку процесу піролізу різних видів аграрної рослинної біомаси.....	45
2.4. Висновки за розділом 2.....	47

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ АГРАРНОЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ.....	48
3.1. Опис методики проведення та експериментальної установки для піролізу аграрної рослинної біомаси.....	49
3.2. Результати досліджень процесу піролізу аграрної рослинної біомаси.....	53
3.3. Результати експериментальних досліджень впливу тиску і температури в камері піролізу та вологості зразків біомаси на кількість виробленого біовугілля.....	63
3.4. Висновки за розділом 3.....	71
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	72
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТКИ.....	80

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему: «Обґрунтування параметрів установки для піролізу рослинної біомаси».

В магістерській роботі наведено математичну модель технологічного процесу пірогенетичного розкладання аграрної рослинної біомаси та обґрунтовано конструкційні параметри установки для піролізу рослинної аграрної біомаси з метою виробництва піролізного газу та біовугілля залежно від обраного режиму роботи установки.

Представлено математичну модель технологічного процесу піролізу аграрної рослинної біомаси та перевірено адекватність її роботи шляхом проведення відповідних експериментальних досліджень. Досліджено кінетичні характеристики зміни температури середовища та маси зразків з різних видів залишків сільськогосподарських культур залежно від фізико-хімічних характеристик зазначених зразків та тиску в системі.

Шляхом проведення багатофакторного експерименту визначено залежність продуктивності установки для піролізу аграрної рослинної біомаси за піролізним газом від фізико-хімічних властивостей рослинної аграрної сировини та режимних параметрів процесу піролізу. Підтверджено високу відповідність результатів моделювання результатам експериментів.

Заявлена методика дає можливість шляхом зміни фізико-хімічних властивостей рослинної сировини та зміни режимних параметрів процесу піролізу програмувати на вимогу споживача виробництво горючого піролізного газу чи біовугілля.

Перший розділ записки магістерської роботи присвячений розкриттю теоретичних основ технологічного процесу термічного розкладання аграрної рослинної біомаси в установках піролізу.

В другому розділі записки магістерської роботи шляхом математичного моделювання представлено технологічний процес, визначено конструкційні параметри установки для піролізу рослинної біомаси та обґрунтовано

продуктивність установки для піролізу рослинної біомаси за виробленим горючим газом та біовугіллям. Обґрунтовано вплив фізико-хімічних властивостей рослинної біомаси та тиску в середовищі на кінетичні характеристики зміни температури середовища та процес піролізу в цілому.

В третьому розділі записки магістерської роботи методом проведення багатофакторного експерименту встановлено залежність продуктивності установки для піролізу аграрної рослинної біомаси за газом фізико-хімічних властивостей рослинної біомаси та режимних властивостей процесу.

В четвертому розділі виконано розрахунки економічної ефективності впровадження запропонованих заходів щодо підвищення ефективності процесу піролізу аграрної рослинної біомаси.

Магістерську роботу представлено на 80 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки формату А4, що містить 35 рисунків, 5 таблиць і 11 слайдів, представлених у презентації. Використано 45 літературних джерел.

Ключові слова: установка для піролізу, рослинна біомаса, піроліз, біовугілля.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$\lambda_{\text{біом}}$ – коефіцієнт теплопровідності біомаси;

$t_{\text{досушування}}$ – тривалість процесу сішіння біомаси, хв;

$t_{\text{напівкоксування}}$ – тривалість процесу напівкоксування, хв;

$t_{\text{попер.піроліз}}$ – тривалість процесу попереднього піролізу (термічного розкладання біомаси, хв);

$t_{\text{сумарне}}$ – тривалість процесу піролізу, хв;

d – вологовміст, кг/кг;

q – кількість теплоти, Дж;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

ρ – насипна щільність, кг/м³;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²/К;

T – температура, °С;

$S_{\text{ч.біом}}$ – площа поверхні частинок біомаси, м²;

$V_{\text{віль}}$ – вільний об'єм, м³;

W – вологість, %;

α'_1 – коефіцієнт надлишку повітря;

$R_{\text{топ.прист.}}$ – продуктивність топкового пристрою;

$G_{\text{біомас}}$ – витрати біомаси на процес піролізу, кг/год;

V^B – сумарна кількість топкових газів, м³;

$V_{\text{азоту}}^0$ – теоретичне значення обсягу азоту, м³/кг;

$V_{\text{CO}_2}^0$ – об'єм CO₂ який утворився при високотемпературному розкладанні 1 кілограма рослинної біомаси, м³/кг;

$V_{\text{вод.пари}}^0$ – об'єм H₂O який утворився при високотемпературному розкладанні 1 кілограма рослинної біомаси;

$\dot{m}_{\text{пари}}$ – потік пари з поверхні частинки біомаси, кг/(м²·с);

$r_{\text{води}}$ – прихована теплота пароутворення, Дж/кг;

x, y, z – відповідні координати, м;

w – доля біомаси, яка прореагувала в процесі піролізу, кг/кг;

P – тиск, Па;

$m_{\text{біовуг}}, m_{\text{газ}}$ – маса біовугілля та газу, кг;

$P_{\text{сис.уп.}}$ – продуктивність системи управління, м³/с;

$P_{\text{конд.}}$ – продуктивність кондиціонера, м³/с;

$P_{\text{насос.}}$ – продуктивність насоса, м³/с;

k – кінетична константа швидкості хімічної реакції, 1/с;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

R – універсальна газова стала, Дж/(Кмоль·К);

M – молярна маса, г/моль.

ВСТУП

В зв'язку зі зменшенням запасів викопних палив використання біомаси рослинного походження, як джерела альтернативної енергії, набуває широкої популярності [1]. Оскільки Україна є аграрною країною, рослинні залишки аграрного виробництва все частіше використовуються не лише в тваринництві та рослинництві (для відновлення вмісту гумусу в ґрунті), але й для виробництва енергії. Рациональне використання рослинних решток також тісно пов'язане з питанням утилізації відходів, коли мова йде про відходи рубок догляду в садках, а також про пошкоджену соломку чи стару неплодоносну виноградну лозу тощо. Кваліфіковане використання таких рослинних решток є однією з суттєвих і досі невирішених проблем сільського господарства [2].

Актуальність теми дослідження. Процес піролізу є одним з перспективних методів переробки аграрних рослинних відходів в палива. Проте існуючі в Україні технології піролізного розкладання рослинної біомаси не відповідають сучасним вимогам за енерговитратами, рівнем екологічності та за економічною ефективністю. Сьогодні, в умовах військової агресії з боку РФ, яка спричинила обмеженість доступу до традиційних енергоресурсів через зруйновану інфраструктуру, існує потреба у високоефективних малогабаритних установках для піролізу рослинної біомаси. Відсутність сучасних технологій та відповідного обладнання для реалізації процесу піролізу стримує переробку аграрних рослинних відходів, непридатних для інших галузей економіки України, в енергію. Значна тривалість процесу піролізу біомаси та низька якість вироблених продуктів (біовугілля, синтез-газу, олія) є причиною відмови аграрних та фермерських підприємствах від такої технології виробництва палив та енергії, а новітні зразки закордонних установок для піролізу біомаси є вартісними та малодоступними.

Таким чином, дослідження технологічно-конструкційних параметрів процесу піролізу аграрної рослинної біомаси з метою виявлення факторів, які сприяють інтенсифікації цього процесу, розробка універсальної методики розрахунку параметрів установки, виходячи з виду біомаси та бажаної продуктивності, проектування сучасного зразка установки для піролізу біомаси є актуальною та своєчасною науковою задачею.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є обґрунтування конструкційних параметрів установки та технологічного процесу піролізу аграрної рослинної біомаси.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішувати такі *завдання*:

- провести аналіз стану технологій та конструкцій установок для піролізу аграрної рослинної біомаси з метою підвищення ефективності цього процесу;

- розробити математичну модель розрахунку параметрів процесу піролізу біомаси, керуванням яких можна підвищити ефективність виробництва біовугілля;

- провести експериментальні дослідження впливу режимних параметрів процесу на його ефективність, а також методом реалізації багатофакторного експерименту встановити вплив тиску і температури в камері піролізу та вологості біомаси на кількість виробленого біовугілля.

Об'єкт дослідження – технологічний процес піролізу аграрної рослинної біомаси.

Предмет дослідження – закономірності впливу технологічних параметрів процесу піролізу та конструкційних параметрів установки для піролізу аграрної біомаси на продуктивність виробництва біовугілля.

Методи дослідження. Аналіз технічного стану установок для піролізу аграрної рослинної біомаси під час роботи, складання математичної моделі та блок-схеми керування процесом піролізу як загалом, так і окремих його етапів зокрема.

Експериментальні дослідження проводилися на піролізній установці

для термічної переробки аграрної рослинної біомаси із врахуванням галузевих стандартів та використовуючи стандартизовані методики проведення експериментів. В якості аграрної рослинної сировини використовували міскантус гігінтеус, качани кукурудзи та стебла соняшника. Експериментальні дослідження слугували для підтвердження розробленої математичної моделі. Statistics 20 та пакет прикладних програм Microsoft 2024 використано для обробки отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

- побудовано універсальну математичну модель, яка поетапно описує процес піролізу аграрної рослинної біомаси та обґрунтовує раціональні режимні параметри піролізної установки;
- розроблено блок-схему керування процесом піролізу;
- виконано аналіз отриманих результатів аналітичного дослідження.

Практичне значення одержаних результатів: обґрунтовано раціональні конструкційно-технологічні параметри процесу піролізу рослинної аграрної біомаси з метою виробництва біовугілля, що дозволило підвищити ефективність цього процесу.

Особистий внесок здобувача. основні результати теоретичних та експериментальних досліджень за темою магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно, а саме: виконано аналіз конструкційно-технологічних параметрів процесу піролізу рослинної аграрної біомаси з метою виробництва біовугілля; розроблено універсальну математичну модель, яка поетапно описує процес піролізу аграрної рослинної біомаси та обґрунтовує раціональні режимні параметри піролізної установки; розроблено блок-схему керування процесом піролізу; проведено експериментальні дослідження та підтверджено високий ступінь відповідності результатів моделювання експериментальним.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ УСТАНОВОК ДЛЯ ПІРОЛІЗУ АГРАРНОЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ

Станом на сьогодні в сільськогосподарській галузі використовують різні методи переробки аграрних залишків рослинної біомаси, використовуючи відповідне апаратне оформлення. Також, присутня значна кількість дослідно-промислових установок, які ще не виведено на рівень широкого використання в промисловості та сільському господарстві. Кожен із згаданих методів має свої недоліки та переваги.

1.1. Сучасні технології та конструкції установок для піролізу рослинної біомаси

Хіміко-термічну переробку аграрної рослинної біомаси можна реалізовувати двома способами: низькотемпературним піролізом і швидкісним піролізом [3]. Класифікація відомих установок для здійснення піролізу рослинної біомаси представлена на рис. 1.1 [4].

Швидкісний хіміко-термічний піроліз аграрної рослинної сировини поєднує низькотемпературний піроліз в середовищі плазми, електротермічний піроліз, окислювальний піроліз, високочастотний піроліз, а також ультрапіроліз рослинної біомаси.

Низькотемпературний піроліз є, по суті, піролізом аграрної рослинної біомаси за класичною технологією.

За [5] піроліз відрізняється за економічними та технічними характеристиками методів конверсії аграрної рослинної сировини, при цьому обов'язково враховуються техніко-технологічні характеристики

процесу, тип установки та вимоги до кількісного та якісного складу вироблених продуктів.

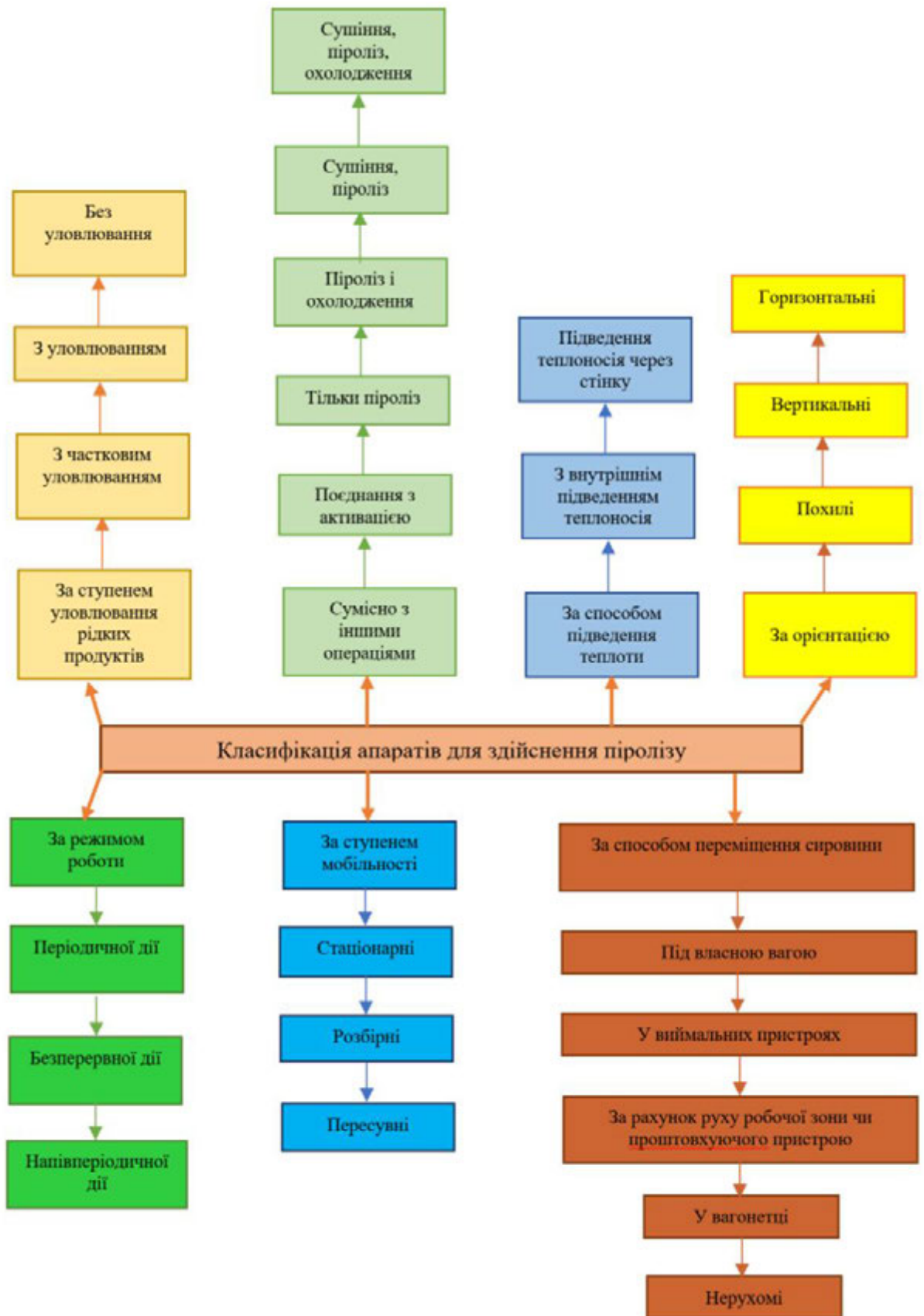


Рис. 1.1. Класифікація установок для здійснення піролізу рослинної біомаси

Метод ультрапіролізу. При цьому методі швидкість нагрівання сировини в камері сягає 1000°C для рослинної сировини на зразок міскантуса гігантеуса, качанів кукурудзи, лушпиння соняха, шкарлупи горіхів (які мають щільну структуру) і подрібнені на шматочки розміром $0,15\dots 2,5$ мм. Температурний режим знаходиться в межах від 480 до 1000°C , що є причиною протікання технологічного процесу в напрямку газифікації сировини до $55\text{--}63\%$. При температурі $680\dots 810^{\circ}\text{C}$ вироблений горючий синтез-газ має максимальну теплотворну здатність, яка становить близько 21 мДж/м³. За режиму, коли температура складає 1000°C , а вологість сягає до 100% ступінь газифікації збільшується з 63 до 75% , проте теплотворна здатність паливного газу зменшується до $12\dots 16$ мДж/кг. Зазначимо, що ентальпія реакції газифікації аграрної рослинної сировини сягає $18,9$ мДж/кг. Загалом при температурах понад $680\dots 700^{\circ}\text{C}$ реакція газифікації є ендотермічною, а при температурах до $600\dots 680^{\circ}\text{C}$ – екзотермічною. За твердженням науковців [5–7], які досліджували процеси піролізу аграрної рослинної сировини, при швидкостях нагрівання в межах $260\text{--}310^{\circ}\text{C}/\text{с}$ та в температурному режимі, який складає $680\dots 1000^{\circ}\text{C}$, за температури $790\dots 915^{\circ}\text{C}$ – виробляється, переважно горючий газ, який містить значну кількість складних вуглеводнів і може застосовуватися для опалювальних цілей. При температурах понад 915°C і до 1000°C , переважно, матиме місце, синтез-газ з високою калорійною здатністю [8]. Керуючи температурними режимами в камері піролізу можна отримувати газ заданого хімічного складу, потрібного вмісту вуглеводнів та горючих компонентів та теплотворної здатності. Зазвичай при цьому доцільно використовувати при піролізі рослинної біомаси додаткові теплоносії, такі як алюмосилікати та різні окиси алюмінію. Якщо задача полягає в отриманні висококалорійного синтез-газу потрібно підвищувати вологість сировини до 100% , поміщати в металевий каталізатор на відповідному носії, якими можуть бути морденіт чи звичайний нікель. В науковій праці [9] представлено апарат для реалізації

ультрапіролізу аграрної рослинної сировини, в якому біомаса швидко нагрівається за 100мс в псевдозрідженому шарі. Сировина знаходиться в середовищі теплоносія менше 500 мс, при цьому температурний діапазон знаходиться в межах 710...1000°C. Автори дослідження [10] представили промислову установку для піролізу рослинної біомаси, на якій удалося отримати високоякісний синтез-газ в кількості 90,2% від сухої частини біомаси. Температура піролітичного розкладання біомаси становила 835°C. Під дією температури та тиску вуглеводні газу переходили в горючі компоненти CO та H₂ з незначним вмістом домішок – CO₂ та вологи, які видалялися з газу шляхом додаткового очищення. Відношення H₂:CO складає в синтез-газі 1,78:1,0, тобто такий газ найбільш придатний для синтезу метанолу. За наведеною технологією на тону метанолу потрібно витратити близько 2,1 тони сировини.

Попри усі переваги даний спосіб піролізу має свої недоліки. Одним з них є потреба у використанні хімічних речовин та каталізаторів (металічних), які сприятимуть виробництву висококалорійного синтез-газу. Також установки повинні бути потужними з енергетичної точки зору, щоб швидко нагрівати біомасу, що є причиною високих фінансових витрат і, як наслідок, призводить до удорожчання кінцевого продукту.

Метод окислювального піролізу. Вказаний метод реалізується шляхом внутрішнього підведення теплоти шляхом розкладання частини рослинної біомаси безпосередньо в шарі з наступним спалюванням піролізних газів, які виділилися в процесі розкладання біомаси, оскільки окислювальні реакції в середовищі газів протікають значно швидше, ніж процес окислення біовугілля, оскільки він є гетерогенним (рис. 1.2). В дослідженні [11] наведено установку окислювального піролізу рослинної біомаси з отриманням рідкої фракції (піролізної олії), виробництво якої в даній установці в 1,6...2,2 рази вище ніж в класичних установках аналогічної конструкції. В роботі [12] наведено результати дослідження з швидкісного піролізу у формованому шарі. При даній технології при інтенсифікації

розкладання рослинної сировини внутрішнє нагрівання є основним технологічним прийомом. Проте усі відомі методи хіміко-термічної конверсії не дають змоги цілком використовувати усю реакційну поверхню біомаси. Навіть, якщо говорити про псевдозріджений та пилоподібний шари, попри їх високу продуктивність, вони характеризуються відносно низькою питомою інтенсивністю.

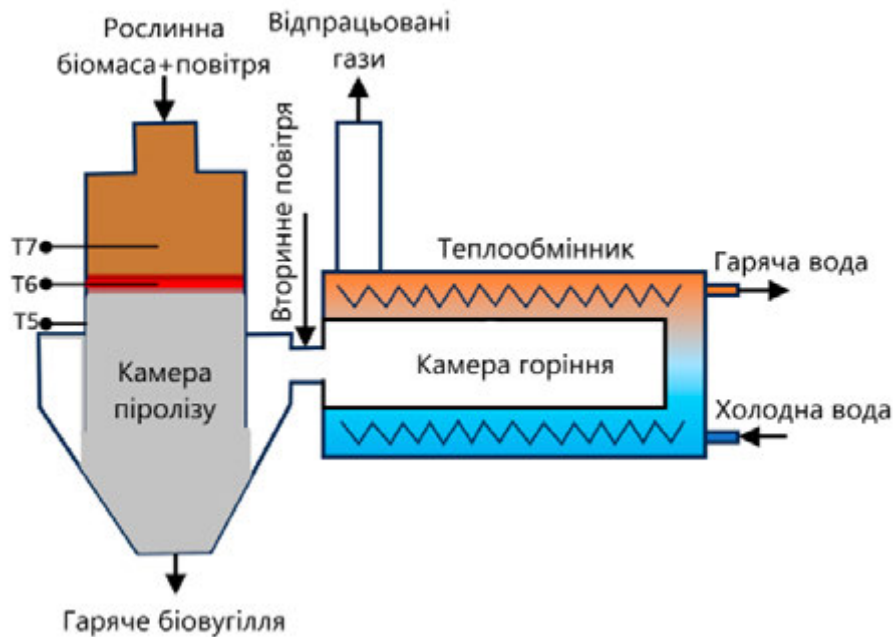


Рис. 1.2. Технологічна схема реалізації окислювального піролізу [12]

Хіміко-термічна конверсія гранульованих палив, які мають розгалужену внутрішню реакційну поверхню, станом на сьогодні є найбільш перспективною. Такий технічний прийом, який полягає в збільшенні швидкості теплоносія без впливу на стійкість шару, який підлягає розкладанню, дає змогу майже нівелювати роль дифузного гальмування піролітичної швидкості та сприяти її зростанню до значень, наближених до константи швидкості хімічної реакції. Вище зазначене експериментально підтверджено дослідженням [13]. Термічному розкладанню підлягали деревні відходи каніфольно-екстрактного виробництва. Піролізна установка мала продуктивність 0,28 тон/год. Дослідженнями підтверджено, що процес піролітичного розкладання деревини можна пришвидшити до

продуктивності 6, тон/год за горючою частиною деревини. Технічні параметри процесу були наступними: швидкість теплоносію – 6,9 м/с; час перебування деревної біомаси в піролізній установці – 145 с; загальна (з врахуванням утворення паливного газу) швидкість процесу – 8,9 м/с; продуктивність установки за біовугіллям – 17%; за смолами – 22,1%. Економічні розрахунки свідчать, що при вартості деревної біомаси \$4 за кубометр та сороквідсотковій вартості біомаси в товарній продукції, собівартість піролізної олії, з врахуванням виробництва побічного продукту – біовугілля, складатиме близько сорока восьми \$/тону.

Попри усі переваги даний спосіб піролізу також має свої недоліки. Одним з них є потреба попередньої підготовки біомаси до використання (гранулювання, виробництво пелет), низька концентрація кінцевих продуктів піролізу у відпрацьованому теплоносії, а також висока вартість та конструкційна складність обладнання для виокремлення летючих продуктів піролізу з вугільного пилу.

Високочастотний піроліз рослинної біомаси. Цей метод реалізується шляхом нагрівання аграрної рослинної біомаси в полі високої частоти (30–510 МГц). Згідно [14] температура та фізико-електричні властивості біомаси, що підлягає нагріванню, чинять суттєвий вплив на ступінь високочастотного нагрівання діелектриків, яке має молекулярний характер (рис. 1.3).

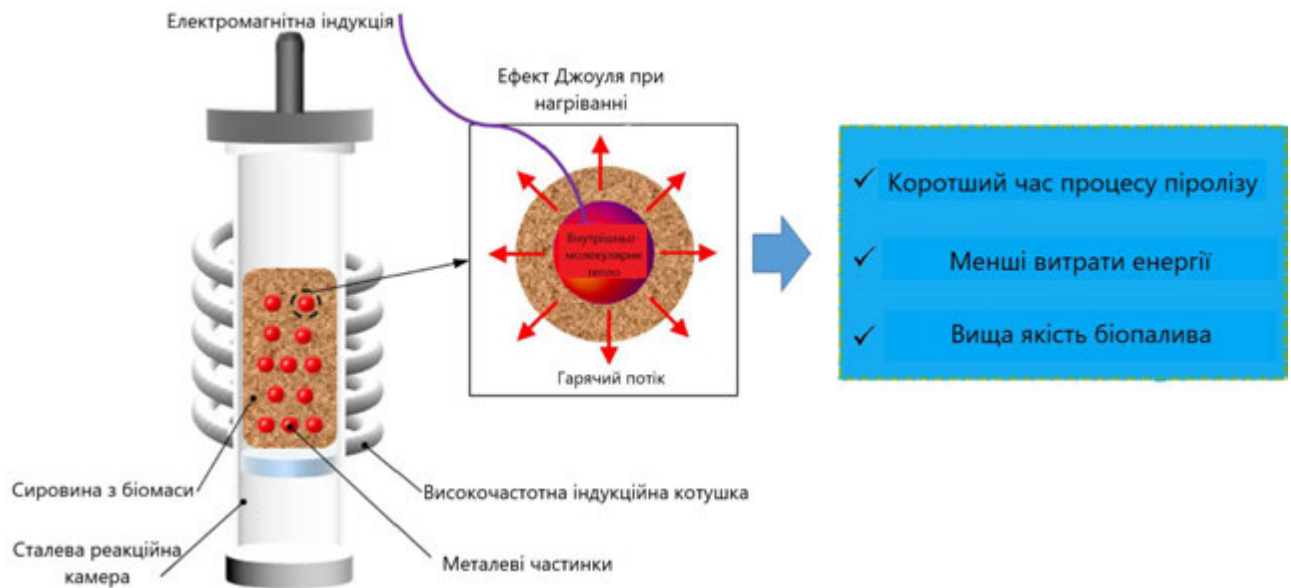


Рис. 1.3. Схема реалізації височастотного піролізу біомаси [14]

Також на швидкість нагрівання біомаси в установці при цьому методі піролізу не впливають теплопровідність біомаси та розмір її частинок. На швидкість нагрівання біомаси впливає виключно кількість питомої потужності, яка підводиться на процес. В дослідженні [15] під час вивчення термічного розкладання рослинної біомаси, яка нагрівалася струмами високої частоти, було помічено, що на характер процесів піролізу та нагрівання не впливає поле частотою 280–510 МГц. Також згідно [16] виявилось, що не залежить від кінцевої температури нагрівання та є майже однаковою ступінь деструкції органічної частини біовугілля різних фракцій при діелектричному нагріванні. В іншому дослідженні [17] зазначено, що для рослинної біомаси довільної вологості доцільно застосовувати поле частотою 22–32 МГц. Отже, на основі проведеного аналізу можна зазначити, що нагрівання рослинної біомаси токами високої частоти є безінерційним, високошвидкісним способом її рівномірного нагрівання в усьому об'ємі до перебігу реакції розкладання (екзотермічного). Слід зазначити, що в цьому інтервалі температур якісних відмінностей в складі кінцевих продуктів порівняно з іншими способами піролізу із зовнішнім нагріванням немає. Недоліком даного методу є висока вартість установок та їх конструкційна

складність і, як наслідок, висока вартість вироблених продуктів піролізу (газів, олії, біовугілля).

Піроліз в низькотемпературному плазмовому середовищі. Даний вид піролізу передбачає плазмохімічну переробку вуглецевмісних матеріалів (рис. 1.4). Різко інтенсифікувати процес розкладання рослинної сировини при одночасному протіканні реакцій дисоціації молекул вихідної біомаси можна встановивши температурний режим в межах 1700–269750°C, забезпечивши наявність електронів, радикалів, іонізованих молекул та інтенсивного ультрафіолетового випромінювання в активній зоні (зоні реакцій). Метод полягає в тому, що газ в електричному розряді, який утворює плазму, іонізується. Електричний розряд, в свою чергу, утворюється між мідним та вольфрамовим електродами. Соплом для виходу плазми є мідний електрод. В роботі [18] зазначений спосіб піролізу науковцями досліджувався із використанням установки УПУ-3. Хімічні реакції, що мають місце при способі піролізу в низькотемпературному плазмовому середовищі, мають суттєву відмінність від тих, що протікають при класичних високотемпературних методах розкладання біосировини. Це пов'язано з релаксаційними властивостями систем та нерівномірністю протікання реакцій. Зазначений спосіб доцільно застосовувати в промисловості для відтворення реакцій хімічних процесів, в яких швидкість та рівновага зміщені в високотемпературну зону [19]. В основі такого способу піролізу покладено здатність деяких газів розкладатися на електрони, іони та атоми. Це дозволяє деяким хімічним реакціям, які не можуть мати місце за класичних умов, протікати завдяки наявності в зоні реакцій вказаних активних частинок.



Рис. 1.4. Схема реалізації процесу піролізу в низькотемпературному плазмовому середовищі

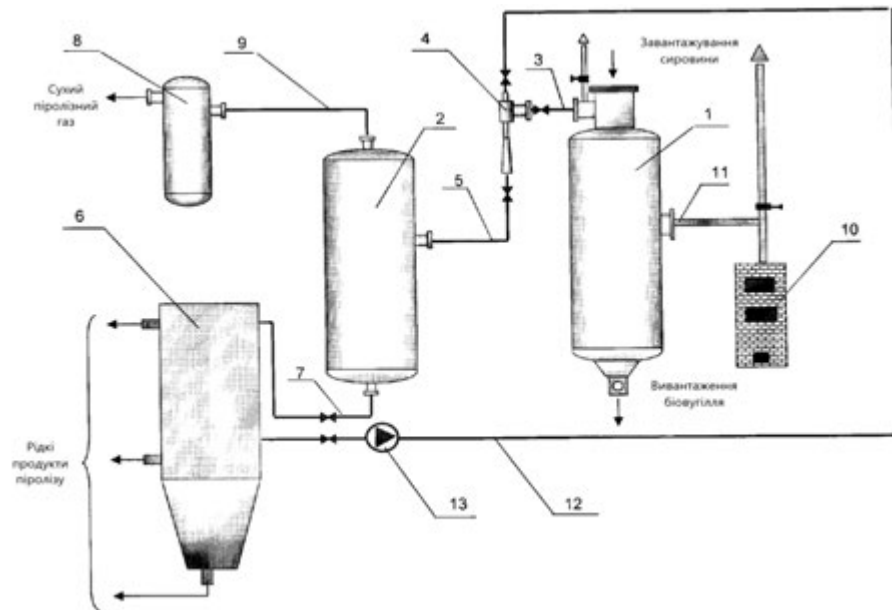
Недоліком вказаного способу піролізу є потреба у високих температурах, що пов'язано з розробкою відповідного складного та вартісного обладнання, а також забезпечення значної кількості енергії для реалізації процесу.

Електротермічний піроліз. Одним з передових способів хіміко-термічного розкладання рослинної біомаси є використання в процесі піролізу електричної енергії. Електротермічний піроліз здійснюється наступним чином: на електроди подається змінний струм промислової частоти, а нагрівання, в свою чергу, здійснюється за рахунок тепловіддачі електродів. Над розпеченим біовугіллям, яке знаходиться в камері піролізу, продувається інертний газ – аргон. Коли сировина нагрівається від теплоти аргону починає протікати процес піролізу. Для забезпечення стабільності процесу потрібно поновлювати об'єм біовугілля, яке проводить електричний струм. Електротермічний піроліз забезпечує реалізацію безперервного розкладання рослинної біомаси з нижчими витратами електроенергії порівняно із високочастотним піролізом. Вказане пояснюється можливістю точного і швидкого регулювання кількості теплоти, яка витрачається на процес, а не лише можливістю різкого прискорення реакцій процесу.

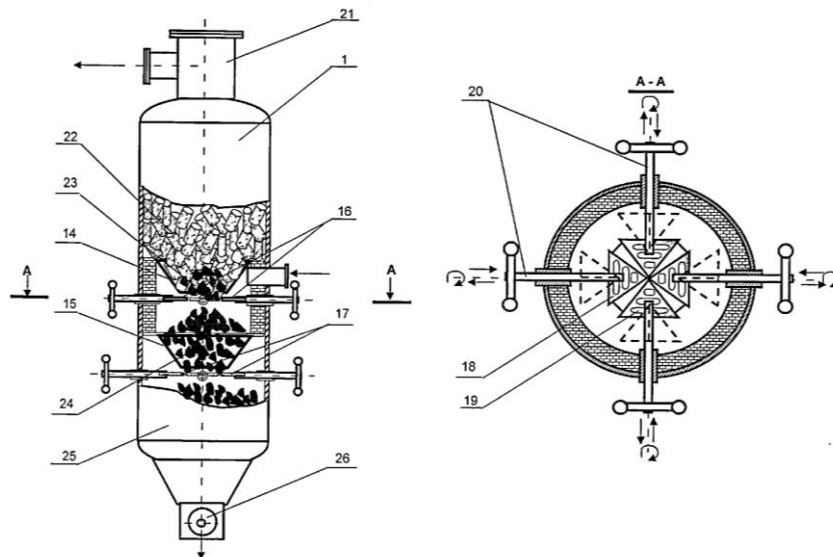
Залежно від температури нагрівання сировини та ступеню її науглецювання використання переходу від іонної провідності рослинною біомасою електричного струму на напівпровідникові властивості вугільного залишку є базою даного способу піролізу. В даному випадку основним летючим продуктом термічного розкладання рослинної біомаси є газоподібні речовини з наступним складом хімічних компонентів: 54% CO, 42% H₂, смоли – до 4%. Із зростанням потужності струму, який подається на процес піролізу, вміст CO та H₂ в газі зростає, в свою чергу біовугілля має високу щільність, а смоли підвищений вміст нейтральних речовин. Недоліками цього способу піролізу є постійні порушення стійкості оброблюваного шару через складність підтримувати контакт між графітовими електродами та біовугіллям.

Спільними недоліками методів швидкісного піролізу є: високі витрати енергії на реалізацію піролізу рослинної біомаси, потреба в конструкційно складному та вартісному обладнанні та установках, висока вартість впровадження проектів з піролізу рослинної агарної біомаси в життя через суттєві економічні, екологічні, соціальні та політичні бар'єри.

Способи низькотемпературного піролізу. Спосіб реалізується в камерах піролізу (неперервної чи періодичної дії) нагріванням біомаси топковими газами до невисоких температур при атмосферному тиску. Метод набув широкого застосування завдяки низькій вартості та широкому спектру продуктів, які можна отримати. Часто використовувалися, як на фермерських, так і на аграрних підприємствах, випалювальні реторти, які продукували біовугілля, а також печі (періодичної, безперервної дії), які мають вищу за інші зразки установок продуктивність, просту конструкцію і здатні виробляти біовугілля високої якості. Установа з вертикальною ретортою на рис. 1.5.



а)



б)

Рис. 1.5. Піролізна установка для виробництва біовугілля з вертикальною ретортою [20]

Установка (на рис. 1.5), призначена для піролізу рослинної біомаси, мстить вертикальну реторту 1 та апарат розділювальний 2. Водогазовий ежектор з проміжними соплами 4, що встановлений на трубопроводі всмоктувального типу 3 між розділювальним апаратом 2 та вертикальною ретортою 1, з'єднаний трубопроводом 5 з апаратом розділювальним 2. Своєю нижньою частиною розділювальний апарат 2 сполучається через трубопровід 7 з відстійником 6. Верхня частина розділювального апарата 2

трубопроводом 9 приєднана до камери 8 для накопичення газу, що не конденсується. З метою виробництва гарячих димових газів встановлено піч зовнішню 10, яка газоходом 11 сполучена з вертикальною ретортою 1. Під верхньою 14 та нижньою 15 конічними воронками всередині реторти 1 встановлено рухомі колосники 16 (верхні) та 17 (нижні), які складаються з сегментів 18, що радіально розташовані по відношенню до центру воронки 14 та 15. Рослинну біомасу 22 завантажують через шлюзову камеру 21, розташовану всередині реторти 1. Біомаса знаходиться над воронкою 14 і підтримується рухомими колосниками 16. Зона підсушування і піролізу біомаси та розпечення біовугілля знаходиться всередині простору, утвореного над поверхнею колосників 16 та обмеженого знизу воронкою 14, а зверху шлюзовою камерою 21. Зона охолодження, кондиціонування та стабілізації напівфабрикату 24 розташована між поверхнею колосників 17 всередині простору обмеженого знизу воронкою 15, а зверху – колосниками 16. По газоходу 11 від зовнішньої печі 10 в реторту 1 під верхні рухомі колосники 16 конічної воронки 14 надходять гарячі димові гази (теплоносій) в шар біомаси 21. Гази, які утворилися в результаті піролізу, які складаються, в свою чергу, з конденсованих та неконденсованих газів, шляхом використання водогазового ежектора з проміжними соплами 4, надходять трубопроводом 5 у вигляді водогазової пульпи в апарат розділювальний 2. Водогазовий ежектор з проміжними соплами 4 забезпечує транспортування парогазів за рахунок власного тиску і одночасно охолоджує і конденсує їх при безпосередньому контакту та змішуванні з робочою водою. Установа для піролізу біомаси спрощує схему циркуляції піролізних газів, переробку супутніх продуктів піролізу, при цьому не порушуючи принципи технологічного процесу. Недоліком установки рис. 1.5 є викид газів, які не конденсуються, в атмосферу, замість їх утилізації.

Конструкція установки безперервної дії для виробництва біовугілля наведена на рис. 1.6.

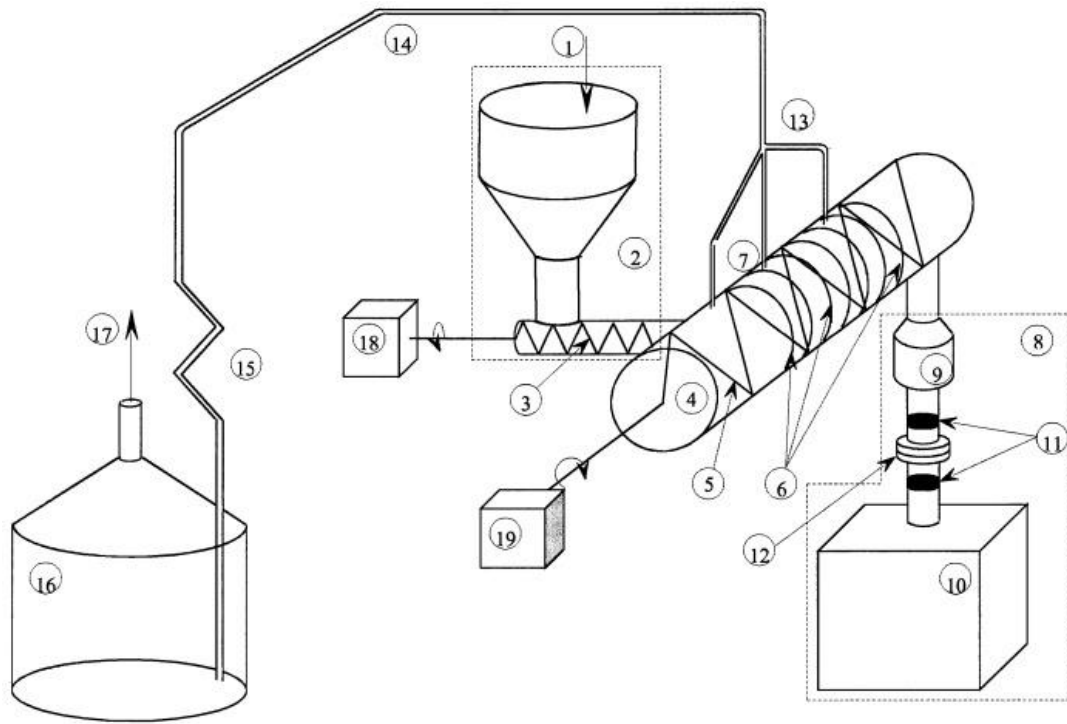


Рис. 1.6. Установка безперервної дії для піролізу сировини, яка містить вуглець [21]: 17 – патрубок відведення газів, які не конденсуються; 16 – ємність; 15 – конденсатор; 14 – магістраль; 13 – концентратор; 12 – роз’єм; 11 – заслінка; 10 – приймальний бункер; 9 – пристрій накопичування і відведення; 8 – вузол розвантажувальний; 7 – труби газозбиральні системи відведення газів та кондиціонування; 6 – елементи електронагрівальні; 5 – шнек головний; 4 – реторта; 3 – живильник шнекового типу; 2 – модуль завантажувальний; 1 – бункер-накопичувач.

Установка рис. 1.6 призначена піролізу рослинної сировини при виробництві біовугілля та побічної продукції (рідких і газоподібних продуктів сухої перегонки). Установка за принципом роботи є безперервної дії. Вона складається з пристрою накопичення біомаси, з’єданого з живильником шнекового типу, до функцій якого входить формування герметичної пробки (межа реторта-живильник) з подальшою безперервною подачею рослинної біомаси в реторту. В свою чергу, реторта є сталеву трубою з поздовжнім шнеком. Це дозволяє плавно просувати частинки біомаси, які підлягають піролітичному розкладанню, через зони сушіння та

піролізу (активна зона реторти) від бункера-накопичувача до вузла розвантажувального (зона розвантажування). Між зоною розвантажування та ретортою для забезпечення герметичності та термічної стабільності процесу встановлено муфту змінного перерізу. Зона розвантажування містить бункер (приймальний) для біовугілля, пристрій накопичування і відведення, які за допомогою роз'єму герметично кріпляться до патрубків відведення готового продукту. Елементи електронагрівальні слугують для нагрівання реторти та проходять по всій довжині труби поза цією трубою. Системи конденсації піролізного газу (синтез-газу) та газовідведення прикріплені до реторти. Перевагою є те, що установка виробляє різні продукти піролітичного розкладання (біовугілля, синтез-газ, піролізну олію) з широкого спектру дрібнодисперсних рослинних відходів аграрного виробництва.

На рис. 1.7 представлено установку для піролізу рослинної біомаси з еліпсоподібним контейнером [22]. Камера для завантаження біомаси та її піролізу з метою теплоізоляції має корпус 1 (внутрішній) та кожух 2 (зовнішній) між якими знаходиться порожнина 3, наповнена повітрям. Рослинна біомаса у подрібненому стані завантажується всередину установки і перебуває в металевому контейнері з прорізами 20 еліпсоподібної форми щоб знизити вплив теплопровідності на термічну переробку сировини. Дно контейнера 7 виконано з можливістю відкриватися, а стінки контейнера оснащені нерухомими шторками 8. В свою чергу, рухомі шторки 9 встановлені по периметру внутрішньої сторони камери і здійснюють регулювання топкових газів. Над контейнером розміщено кришку 30, а під кожухом розміщено контейнер для жишки 26. Тепло на процес піролізу надходить від згорання газоподібних продуктів біомаси, яка розкладається в топці 28. Запуск установки виконують за умови герметизації внутрішнього корпусу від поду установки. Надлишкова теплота, яка виділяється при термічному розкладанні біомаси використовується для попереднього підсушування нової порції біомаси в суміжній камері. По закінченню роботи

установку відкривають для повного охолодження.

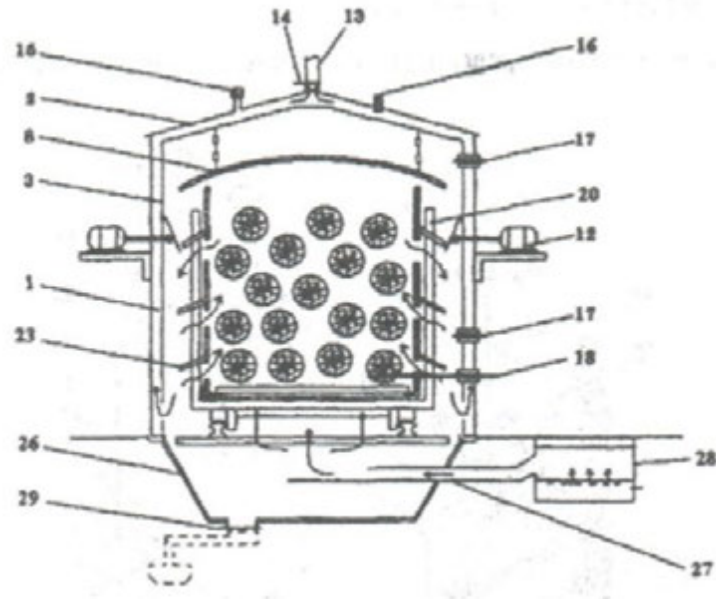


Рис. 1.7. Установку для піролізу рослинної біомаси з еліпсоподібним контейнером (мобільного типу) [22]: 29 – заслінка; 28 – камера спалювання; 27 – труба димова; 26 – ємність; 25 – прорізи; 24 – замок; 23 шторки нерухомі; 20 – стойки; 19 – напрямні; 18 – металевий стержень; 17 – термопари; 16 клапан запобіжний; 15 – газоаналізатор; 14 – заслінки; 13 – труба димова; 11 – шток; 9 – шторки рухомі; 8 – кришка ввігнута; 5 – пристрій підйомний; 4 – кришка; 3 – стіни; 2 – кожух зовнішній; 1 – порожнина повітряна.

Істотними недоліками установок низькотемпературного піролізу, є: відсутність ефективної системи охолодження; відсутність гнучкого регулювання режимами роботи установки; забруднення довкілля через відсутність використання газів, які відводяться з робочої зони; низька ефективність через нагрівання через стінку топковими газами.

1.2. Теоретичні основи процесу піролізу біомаси

Процес піролізу залежить від багатьох факторів: часу знаходження піролізних газів в зоні реакцій; температури карбонізації кінцевої; вологості біомаси, тиску в камері піролізу, температури, швидкості нагрівання; щільності частинок біомаси; розміру частинок біомаси.

На швидкість протікання хімічних реакцій процесу піролізу найбільший вплив чинить розмір частинок біомаси. Діапазон розмірів частинок біомаси складає 0,1–3 см. При розмірах частинок менших за 0,1 см процес піролізу обмежується хімічною реакцією, а при розмірах частинок понад 3 см складно забезпечити рівномірне нагрівання частинок палива. Температура стінки, яка віддає тепло на процес, чинить суттєвий вплив на частинки біомаси будь-якого розміру у цьому діапазоні, але переважно на частинки меншого розміру.

Швидкість розкладання частинок біомаси залежить від швидкості нагрівання та розміру частинок, які підлягають піролітичному розкладанню. Інтенсивність процесу зростає при збільшенні швидкості нагрівання частинок біомаси, при чому швидкість розпаду майже не залежить від розміру частинок. Суттєвий вплив на швидкість процесу піролізу чинить і хімічний склад рослинної біомаси, який є причиною автокаталітичних та каталітичних реакцій. Також на швидкість термічного розкладання чинять вплив фізичні властивості біомаси (щільність). Високі значення щільності біомаси є причиною гальмування хімічних процесів через обмеження вільного руху продуктів розкладання в порожнинах всередині пор. В момент, коли вже мають місце мікроскопічні зміни в структурі біомаси вплив вказаних факторів на піролітичне розкладання зменшується.

Автори роботи [23] дослідили вплив кінцевої температури розкладання біомаси в межах 280–1010°C на властивості та склад біовугілля. Зростання вмісту вуглецю в кінцевому продукті має місце за умови збільшення кінцевої температури випалювання з 280 до 590°C, і спостерігається

сповільнення росту вмісту H_2 в кінцевому продукті при зростанні температури до $1010^\circ C$.

При зростанні температури випалювання з 280 до $590^\circ C$ виробництво кінцевого продукту різко зменшується, на противагу вмісту вуглецю. Подальший ріст температури призводить до зменшення відсотка кінцевого продукту і ступінь зменшення є прямопропорційною зростанню температури.

В діапазоні температур від 280 до $1600^\circ C$ за умов зростання кінцевої температури випалювання вміст водню зменшується, і вказане зменшення є пропорційним зміні температури. Діапазон 380 – $620^\circ C$ є оптимальним для вивільнення летючих речовин. Однак, при миттєвому зростанні температури з 280 – $690^\circ C$ вміст летючих речовин, що виділилися в з біовугілля, суттєво знижується. При температурах 590 – $690^\circ C$ щільність оброблюваного біовугілля різко зростає. Вказаний температурний режим застосовується для зміни структури біовугілля та збільшення твердості виробленого біовугілля.

Здатність до самозаймання є ще однією важливою характеристикою якості біовугілля, яка, в свою чергу, залежить від здатності біовугілля поглинати кисень повітря. За [23] при кінцевій температурі випалювання рівній $429^\circ C$ для палива з рослинної біомаси здатність поглинати кисень є максимальною, тому, залежно від вимог до кінцевого продукту, кінцеву температуру випалювання підтримують або вищою за $429^\circ C$, або, навпаки, нижчою. Очевидним є той факт, що склад продуктів термічного розкладання палива (гранул, пелет) з рослинної біомаси повністю відповідає складу продуктів термічного розкладання суміші її базових компонентів в тій же відносній кількості, в якій вони присутні в паливі з біомаси. Отже, знаючи умови процесу піролізу (тиск, температуру) та хімічний склад біомаси, яку термічно розкладають, можна визначити основний склад вироблених продуктів в результаті піролізу цієї біомаси.

Вміст вологи в біомасі також має вирішальний вплив на протікання

процесу піролізу. Високий вміст в біомасі вологи є причиною нерівномірного протікання екзотермічних реакцій, що зменшує загальну кількість теплоти, яка виділяється. Відсутність вологи в біомасі інтенсифікує процес термічного розкладання сировини, температура реакційного шару різко зростає за рахунок теплоти реакцій. Проте якість кінцевих продуктів піролізу значно погіршиться через інтенсивне розпадання парів рідких продуктів.

Отже, сумуючи вище зазначене, тепловий ефект екзотермічної реакції є одним із параметрів впливу на конструкційне оформлення піролізної установки. Практична доцільність зазначеного полягає в тому, що під час складання теплового балансу піролізної установки тепловий ефект є найбільшою складовою статті надходжень. За [24] рекомендують теплоту, виділену при протіканні екзотермічної реакції, приймати на рівні 6,5...7% від вищої теплотворної здатності біомаси, яка піролізується.

Таблиця 1.1

Тепловий ефект, отриманий при протіканні екзотермічної реакції процесу піролізу

Температурний режим процесу піролізу біомаси	Тепловий ефект, отриманий внаслідок реалізації процесу піролізу рослинної біомаси, МДж/кг		
	Отриманий теоретичним шляхом		Експериментально встановлений
	За рахунок утворення метану	За рахунок реакцій окислення	
370	0,00641	1,005	0,713
490	0,03084	0,954	1,088
610	0,03972	1,121	1,587
705	0,61214	1,103	1,503

Ще одним важливим параметром впливу на процес піролізу є тиск в камері піролізу. Високий тиск має такий же негативний ефект на протікання процесу піролізу як і невисока температура нагрівання біомаси чи занадто великий розмір частинок біомаси, яка підлягає піролітичному розкладанню. Якщо до вище зазначеного додати збільшення часу перебування в зоні реакцій парогазів через руйнування рідких піролітичних продуктів чи вторинних

реакцій крекінга, виробництво кінцевих продуктів піролізу та їх якість зменшуються. Найбільший вплив час перебування сировини в камері піролізу чинить на виробництво компонентів складних вуглеводнів (смола розчинних). Рідкі продукти містять термодинамічно стійкі складові, які мають нижчу молекулярну масу. При підвищенні тиску в системі із центру частинки біомаси транспортування парів смола стає більш складним, що спричиняє, при транспортуванні смола через периферійні ділянки, їх вторинне розкладання, оскільки на периферії температура завжди вища ніж в центральній частині. Як наслідок, зростає виробництво синтез-газу і падає кількість смола, виділених в процесі піролізу. Вироблений синтез-газ має високий вміст CH_4 , який може виділитися як в результаті часткового піролізу парів смола, так і через протікання реакції $\text{CO} + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$. Рівновага реакції зсувається вліво, коли тиск падає, бо вона протікає із збільшенням об'єму і, навпаки, вправо, коли тиск росте. Теплота згорання первинного газу також росте через збільшення в газі CH_4 [24].

Аналіз зазначених робіт свідчить, що параметрами керування піролізом є тиск, розмір та швидкість нагрівання частинок біомаси, змінюючи які, отримуємо різні кінцеві продукти в різній кількості з одного виду біомаси.

Зміна тиску зазначає рівень ущільнення та ступінь конденсації пароподібних органічних речовин, які утворюються під час піролізу біомаси. Тиск та швидкість реакції є в прямій пропорційності. Отже, швидкість реакції зростає при підвищенні тиску і, навпаки, спадає, при зменшенні тиску. Тривалість знаходження парогазів в піролітичній установці збільшується при зростанні сумарного тиску в системі, де парогаси, торкаючись розпечених стінок елементів обладнання, розпадаються. В свою чергу, парогаси швидко полишають піролізну установку і гірше піддаються розкладанню при розрідженні в системі. Найбільший вплив тиск чинить на виробництво смола та вугілля, де збільшення тиску спричиняє більше виробництво вугілля і менше виробництво смола. Також із зростанням тиску

збільшується виробництво метилового спирту, оцтової кислоти, ацетону

Отже, виробництво біовугілля та піролізної олії можна контролювати тиском в системі.

1.3. Математичні залежності для розрахунку процесу піролітичного розкладання рослинної біомаси

Математичні залежності для розрахунку процесу піролітичного розкладання рослинної біомаси передбачають визначення тривалості процесу пірогенетичного розкладання цієї біомаси. Через відсутність апробованих кінетичних та теплофізичних характеристик виконання розрахунків щодо розкладання рослинної біомаси, які ґрунтуються на рівняннях тепло-, масообміну та фізичної хімії, не мають належного поширення. Для виконання таких розрахунків потрібно знати значення щонайменше 6 обов'язкових параметрів: теплоти розкладання, множника передекспоненціального, енергії активації, теплопровідності, теплоємності та щільності.

Якщо мова йде про частинки біомаси малого розміру, окрім температури в реакційній зоні, для визначення тривалості процесу піролітичного розкладання біомаси, потрібно ще знати параметри реакції розкладання (в даному випадку кінетичні). Тривалість процесу піролізу:

$$t = R \left(e^{-\frac{E}{RT}} \cdot k_{\text{роб}} \cdot 240 \right)^{-1}. \quad (1.1)$$

Тривалість процесу піролізу за умови, що розмір частинки біомаси, яка піролітично розкладається, понад три міліметри (додатково враховуються теплота реакції, енергія активації, теплопровідність, щільність біомаси):

$$t = \rho_{\text{біом}} \cdot \Delta H \cdot R^2 (k_2 \cdot (T_0 - T_{\text{підсуш}}) \cdot 240)^{-1}. \quad (1.2)$$

Автори роботи [25] пропонують математичну залежність, згідно якої тривалість процесу піролізу визначається як сума тривалості етапів напівкоксування, попереднього піролізу та досушування:

$$t_{\text{сумарне}} = t_{\text{досушування}} + t_{\text{попер.піроліз}} + t_{\text{напівкоксування}}. \quad (1.3)$$

Тривалість етапу досушування визначається за рівнянням:

$$t_{\text{досушування}} = q \cdot W \cdot R^2 (4 \cdot [T_1 - T_2] \lambda_2)^{-1}. \quad (1.4)$$

Тривалість етапу попереднього піролізу визначається за рівнянням:

$$t_{\text{попер.піроліз}} = \left(R^2 \left[-\ln\theta - \left(\frac{r\gamma}{R} \right) I_0 \cdot \ln A \right] \right) / (a\gamma^2). \quad (1.5)$$

Тривалість етапу напівкоксування:

$$t_{\text{напівкоксування}} = \frac{-R^2 \cdot \ln \left(I_0 \cdot A \cdot H \left(\frac{r\gamma}{R} \right) \right) - \ln \left(\frac{P_0}{P_d} \right) (-C+1) - \ln\theta}{(\gamma^2 + P_d) \cdot a}. \quad (1.6)$$

Також кількість та вид кінцевого продукту за процесом піролізу можна визначати за емпіричними математичними залежностями [26]:

$$f_1(t) = 0,0025 \cdot \tau^2 - 0,00219 \cdot \tau + 0,3715. \quad (1.7)$$

При максимальних швидкостях нагрівання рослинної біомаси виробництво біовугілля розглядають як функцію, залежну від температури, якої вдалося досягти в активній зоні (зоні реакцій). За рівнянням (1.7) за максимальних швидкостей нагрівання кількість виробленого газу та олії є функцією часу прогрівання біосировини та температури:

$$f_2 = q_1(\tau; t). \quad (1.8)$$

$$f_2 = q_2(\tau; t). \quad (1.9)$$

Аналіз математичних залежностей свідчить, що станом на сьогодні розроблено достатньо залежностей, щоб описати технологічний процес піролізу рослинної біомаси. Проте через відмінність фізико-хімічних властивостей рослинної біомаси усі відомі залежності носять виключно локальний характер. Отже, є потреба розробити універсальні математичні залежності, якими буде зручно користуватися і які враховуватимуть такі параметри як вологість біомаси, тиск середовища тощо.

1.4. Фізичні та теплотворні властивості рослинної біомаси та біовугілля

Теплоємність рослинної біомаси пов'язана з такими параметрами як температуропровідність та теплопровідність, які описуються відповідними коефіцієнтами, і описують процес перенесення теплоти всередині сировини.

Біомаса є складною системою, яка складається з целюлози, зв'язаної та вільної води, пари та газу. Таким чином тепло всередині рослинної

біомаси передається за рахунок радіації, конвекції та теплопровідності. За рівнянням (1.10) коефіцієнт температуропровідності становить:

$$a = \lambda(\rho \cdot c)^{-1}. \quad (1.10)$$

Шляхом прямого вимірювання потоку теплоти можна визначити під час процесу піролізу такий показник як ефективне значення теплоємності. На рис. 1.8 наведено характер зміни ефективної теплоємності під час нагрівання біомаси. Зміну коефіцієнта температуропровідності наведено на рис. 1.9 [26].

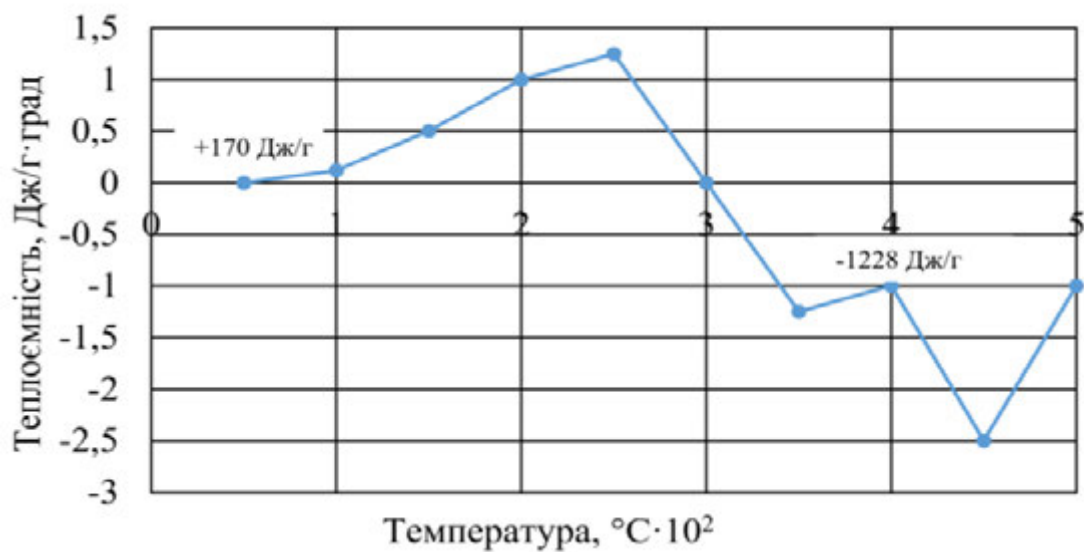


Рис. 1.8. Залежність теплоємності рослинної біомаси від температури процесу піролізу в системі «рослинна біомаса – біовугілля»

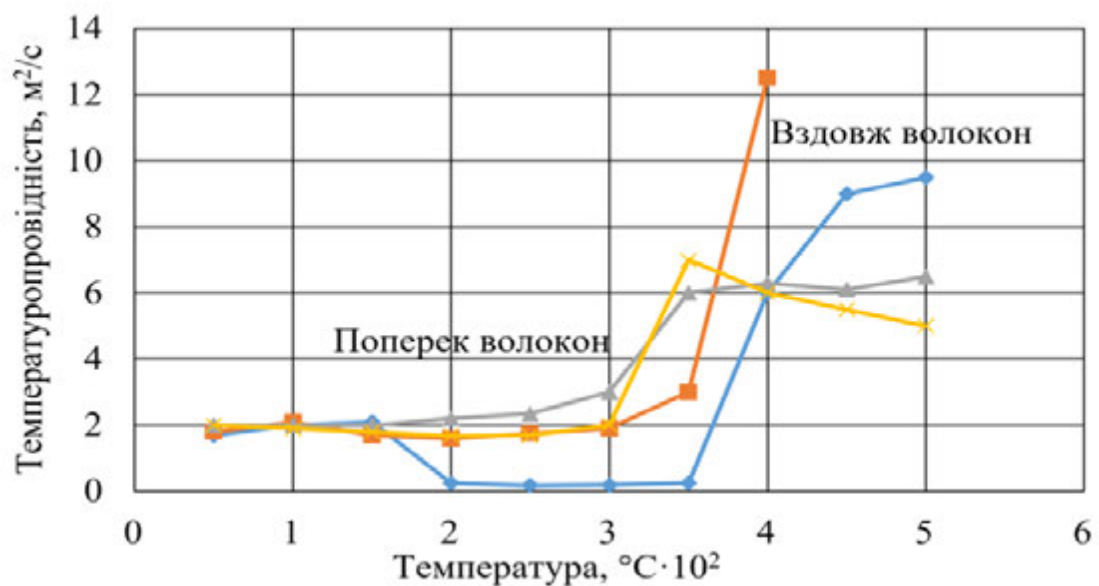


Рис. 1.9. Залежність температуропровідності від температури процесу піролізу в системі «рослинна біомаса – біовугілля»

Із графічних залежностей (рис. 1.8 та 1.9) випливає, що ефективна температуропровідність суттєво коливається при зростанні температури в діапазонах 95–118°C та 295–355°C.

Коефіцієнт температуропровідності поперек волокон менше удвічі за відповідні значення коефіцієнту вздовж волокон біомаси.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Аналіз конструкцій установок для піролізу біомаси свідчить, що в більшості випадків, вони не відповідають сучасним вимогам щодо ефективності, енерговитрат і екологічності, тому потребують удосконалення.

2. Розглянуто теоретичні основи процесу піролізу біомаси, які дають розуміння, що процес можна зробити контрольованим та високоефективним шляхом встановлення зав'язків між параметрами процесу (температура, тиск), властивостями біомаси (вологість) та якісними показниками виробленого кінцевого продукту.

3. Наведено рівняння, які будуть використані для розробки математичної моделі процесу піролітичного розкладання рослинної біомаси.

4. Наведено фізичні та теплотворні властивості біомаси та біовугілля для встановлення граничних значень незалежних параметрів впливу на ефективність процесу для здійснення обрахунків за математичною моделлю.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ АГРАРНОЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

2.1. Фізико-хімічні основи процесу піролізу рослинної біомаси

Процес піролітичного розкладання рослинної біомаси є сукупністю кількох менших процесів, а саме: нагрівання, випаровування вологи (сушіння), термічного розкладання та охолодження [27]. Для опису процесу піролізу, розглянемо термічне розкладання частинки біомаси в середовищі топкових газів. На початку процесу піролізу в камеру піролізу надходять гарячі гази (можуть використовуватися топкові), які здійснюють процес нагрівання частинок рослинної біомаси. Етап сушіння починається коли температура поверхні частинки біомаси досягає температури «вологого» термометра. Описаний стан обґрунтовується тим, що вологість частинок біомаси є досить високою на початку етапу сушіння, а волога, яка з поверхні частинок випаровується, швидко відновлюється через процес дифузії вільної вологи.

Стадія термічного розкладання розпочинається коли температура поверхні частинки біомаси збільшується до 400...450°C. Температурний градієнт різко зростає коли збільшується інтенсивність нагрівання частинки через наявність в ній залишкової вологи. Частинку, при цьому, можна умовно поділити на три зони: зону нагрівання; термічного розкладання сировини; готового продукту. Коли температурне поле починає проникати вглиб частинки біомаси починається стадія її термічного розкладання. Тепловий ефект, або виділення теплоти в результаті термічного розкладання, має місце внаслідок протікання хімічних реакцій. Початкова фаза розпаду біомаси має місце при температурах 135–190°C. Цей процес спричиняє зміни елементарного та хімічного складу частинок біомаси, внаслідок реакцій

виділяється вуглекислота, реакційна вода та розпочинається розпад найменш термостійких складових біомаси. Збільшення температурного впливу призводить до більш складних фізико-хімічних процесів. Інтенсивне руйнування біомаси з утворенням основних продуктів розпаду та виділенням теплоти має місце в діапазоні температур близько 260–390°C. Молекули частинок біомаси завдяки теплоті, яка підвелася до біомаси, стають достатньо рухливими, щоб відокремитися від вуглецевмісних груп і утворити нові речовини з меншою вагою (молекулярною). Далі слідує зміна структури масиву вуглецю, внаслідок чого частинка біомаси має інший розмір пор та змінену внутрішню поверхню. Продукти піролітичного розкладання частинок біомаси вивільнюються назовні через макропори діаметром в кілька мікрон завдяки зміні тиску. З метою пришвидшення процесу сушіння частинок біомаси та видалення продуктів їх піролізу в реакційній зоні створюють розрідження. Якщо постає завдання збільшити виробництво рідких продуктів, то застосовують примусове відбирання парогазової суміші з установки, що зменшує ступінь її розкладання. Регулюванням тиску можна змінювати ступінь вивільнення продуктів піролізу з частинки біомаси і забезпечувати тим самим часткову чи повну карбонізацію летучих компонентів в біовугілля, збільшуючи чи зменшуючи його виробництво. Вироблене біовугілля слід позбавити можливості самозайматися, тобто його стабілізують охолоджуючи до температури 50–75°C, після чого воно готове до використання.

2.2. Методика розрахунку параметрів установки для піролізу рослинної біомаси

Процес піролізу рослинної біомаси є досить складним і містить кілька підпроцесів, кожен з яких потрібно описувати та моделювати окремо. Отже, схему розрахунку виробництва біовугілля можна навести у вигляді окремих блоків: нагрівання частинок рослинної біомаси; сушіння частинок біомаси;

термічне розкладання частинок біомаси та конденсація продуктів піролітичного розкладання; охолодження виробленого біовугілля.

Поділ процесу на окремі підпроцеси скорочує кількість обрахунків і з достатнім ступенем ймовірності дозволяє говорити про процес в цілому. Тривалість процесу піролізу біомаси $t_{\text{біомаси}}$ зазначимо як суму окремих процесів, а саме: охолодження $t_{\text{охол.}}$, сушіння $t_{\text{сушіння}}$, нагрівання $t_{\text{нагрів}}$, термічного розкладання $t_{\text{терм.розкл.}}$.

Напишемо рівняння визначення тривалості процесу піролізу:

$$t_{\text{біомаси}} = t_{\text{терм.розкл.}} + t_{\text{нагрів}} + t_{\text{сушіння}} + t_{\text{охол.}} \quad (2.1)$$

Моделювання процесу нагрівання частинок рослинної біомаси під час піролізу

Процес нагрівання частинок рослинної біомаси розпочинається з моменту надходження гарячих газів (топкових) до реакційної камери, яке цілком заповнює порожнини між біомасою, яка нагрівається. Тому гарячі топкові гази одночасно прогривають з усіх сторін частинки біомаси, порожнини між ними по висоті усього шару палива. Таким чином спочатку спостерігається нагрівання вологої частинки біомаси доки температура її поверхні не стане рівною температурі вологого термометра, а надалі волога з поверхні частинки починає випаровуватися і частинка біомаси починає підсушуватися зі сталою швидкістю. Коли межа насичення клітин частинок біомаси є вищою за її початковий вологовміст, вивчають лише етап нагрівання частинки біомаси до температури розкладання при сталому вологовмісті [28].

Зазначимо залежність, яка описує процес перенесення енергії газопарової суміші в прямокутних координатах:

$$\varphi_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} = ([\rho \cdot c]^{-1} Q) + a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (2.2)$$

Топкові гази при переміщенні в реакційній зоні віддають тепло біомасі, отже функцію теплового стоку запишемо наступним чином:

$$Q = (T_1 - T) \alpha \cdot S_{\text{біом}} \cdot V_{\text{віл}}^{-1}. \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) при умові нехтування зміною T_1 через молекулярну теплопровідність гарячих топкових газів та з урахуванням (2.2) запишемо:

$$\varphi_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} = (T_1 - T) \cdot \alpha \cdot S_{\text{біом}} \cdot (\rho \cdot c \cdot V_{\text{віл}})^{-1}. \quad (2.4)$$

Виконавши певні дії з перетворення рівняння (2.4) напишемо залежність, яка описує зміну температури теплоносія при його проходженні через шар з частинок рослинної біомаси:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\varphi_z \frac{\partial T}{\partial z} + (T_1 - T) \cdot \alpha \cdot S_{\text{біом}} \cdot (\rho \cdot c \cdot V_{\text{віл}})^{-1}. \quad (2.5)$$

При протіканні теплообмінних процесів між газопаровою сумішшю та частинками біомаси в шарі одночасно має місце теплопровідність всередині шматочка біомаси. Таким чином на етапі нагрівання частинки біомаси рівняння теплопровідності матиме вигляд:

$$\partial T_1 / \partial t = (\rho \cdot c_1 \cdot x_{1\text{газ}})^{-1} \frac{\partial}{\partial x_{1\text{газ}}} (\lambda_{\text{біом}} \cdot x_{1\text{газ}} \cdot \partial T_1 / \partial x_{1\text{газ}}). \quad (2.6)$$

Для визначення теплоємності частинки рослинної біомаси використаємо залежність, яка враховує зміну цього значення залежно від зміни температури і вологості цієї частинки:

$$c_1 = 1,18 \cdot \left(\left[\frac{T}{100} + 1 \right] \cdot W \right)^{-\frac{W}{10000} - 0,23}. \quad (2.7)$$

За емпіричним рівнянням [29] визначимо коефіцієнт теплопровідності частинок рослинної біомаси на етапах нагрівання і сушіння:

$$\lambda_1 = \sqrt{0,0099 + 0,00081^{0,298} + W \cdot \ln(W) \cdot 0,9865 \cdot 10^{-4} \exp \left[\frac{T}{99,754} \right]}. \quad (2.8)$$

Запишемо граничні умови для рівнянь (2.6) та (2.5):

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_2} = \alpha(T_1 - T), \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0} = 0, \quad (2.10)$$

$$T_1(t; 0) = T_1. \quad (2.11)$$

Запишемо початкові умови для рівнянь (2.6) та (2.5):

$$T(0; z_1) = T_{\text{поч}}, \quad (2.12)$$

$$T_1(0; x_1) = T_{1\text{поч}}. \quad (2.13)$$

Отже рівняння (2.5–2.13) описують процес нагрівання шару матеріалу рослинної біомаси та перенесення теплоти в шарі цього дрібнодисперсного матеріалу. Температуру теплоносія визначимо за рівнянням [29]:

$$T_2 = \frac{(I_0 d - W + 728)}{[c_3(0,0873 + 0,0162 \cdot W + 0,014d_0) + c_2(\alpha'_1 + 0,07)]}. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт надлишку повітря (α'_1) – це відношення об'єму повітря, який на практиці витрачається на термічний розклад 1 кілограму біомаси $V_{\text{дійсне}}$ до теоретично визначеного об'єму $V_{\text{розрах.}}$ становить:

$$\alpha'_1 = V_{\text{дійсне}} \cdot (V_{\text{розрах.}})^{-1}. \quad (2.15)$$

Шукаємо продуктивність топкового пристрою, який визначає потрібний обсяг топкових газів, виділених в процесі горіння біомаси:

$$P_{\text{топ.прист.}} = V^B \cdot G_{\text{біомас.}} \quad (2.16)$$

Витрати біомаси на процес піролізу є відношенням потужності камери топкової до теплоти, яка була корисно використана:

$$G_{\text{біомас.}} = Z_{\text{біомас.}} / q_{\text{корис.}} \quad (2.17)$$

Сумарна кількість топкових газів V^B згідно [30]:

$$V^B = V_{\text{розрах.}}(\alpha'_1 - 1) + V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (2.18)$$

Теоретичне значення N_2 визначимо наступним чином:

$$V_{\text{азоту}}^0 = 3,647 - 0,04122 \cdot (A_p + W_p). \quad (2.19)$$

Об'єм CO_2 який утворився при високотемпературному розкладанні 1 кілограма рослинної біомаси:

$$V_{\text{CO}_2}^0 = 0,9622 - 0,0088 \cdot (A_p + W_p). \quad (2.20)$$

Об'єм H_2O який утворився при високотемпературному розкладанні 1 кілограма рослинної біомаси:

$$V_{\text{вод.пари}}^0 = 0,7122 + 0,00512 \cdot W_p - 0,006998 \cdot A_p. \quad (2.21)$$

Щоб адекватно змоделювати теплообмінні процеси, що мають місце в шарі рослинної біомаси в процесі піролізу потрібно експериментально встановити такий параметр як коефіцієнт тепловіддачі від потоку розпеченого фільтруючого середовища до поверхні частинки біомаси.

Значення коефіцієнту тепловіддачі, встановлених експериментально для деяких видів сировини наведено в [30].

Моделювання процесу сушіння частинок рослинної біомаси під час піролізу

Коли частинка рослинної біомаси з постійною вологістю прогрівається і температура її поверхні сягає рівня температури мокрого термометра, далі при постійній швидкості сушіння протікає процес вивільнення вологи з поверхні частинки [31]. Якщо зважити на високий тепло та масообмін частинки рослинної біомаси то процес сушіння триває доки температура на поверхні частинки не досягне температурних меж розкладання рослинної сировини. Також процеси нагрівання та сушіння може протікати стадійно якщо початковий вологовміст частинок був вищим за межу насичення стінок клітин [32]. В процесі постійної швидкості сушіння зміну вологості частинки рослинної біомаси можна визначити за рівнянням [33]:

$$\frac{dW}{dt} = S_{\text{ч.біом.}} \cdot \text{пари} \cdot (V_{\text{ч.біом.}} \cdot \rho_2)^{-1}. \quad (2.22)$$

За рівнянням масовіддачі пари (потік пари з поверхні частинки біомаси) становитиме [34]:

$$\text{пари} = (S_{\text{ч.біом.}})^{-1} \frac{dm_{\text{води}}}{dt} = \gamma_{\text{роб}} (P_{\text{норм}} - P) = \frac{\gamma}{T \cdot R_{\text{пари}}} (p_{\text{насих}} - p). \quad (2.23)$$

Використаємо імперичне рівняння для визначення впливу температури на насичення водяною парою [35]:

$$p_{\text{насих}} = \exp(D - C/T). \quad (2.24)$$

В суміші парціальний тиск пари становитиме:

$$p = P \cdot (V^B)^{-1} \cdot V_{\text{води}}. \quad (2.25)$$

Отже, для залежності (2.6) гранична умова (2.9) матиме наступний вигляд:

$$-\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_2} = \alpha (T_1 - T) - \text{пари} \cdot r_{\text{води}}. \quad (2.26)$$

Тривалість процесу сушіння можна визначити розв'язавши, виходячи з початкових умов, спільно рівняння (2.22 – 2.25) та (2.6):

$$T_1(0; x_1) = T_1(t_{\text{парі}}; x_1), \quad W(t_{\text{парі}}) = W_{\text{насич}}. \quad (2.27)$$

Моделювання процесу термічного розкладання частинок рослинної біомаси під час піролізу

Коли процес сушіння закінчується, то при постійній високій температурі енергоносія температура на поверхні частинки біомаси продовжує рости до настання процесу термічного розкладу частинки [36]. Для обраного об'єму зміну кількості частинок рослинної біомаси, що прореагувала, визначимо за рівняннями хімічної кінетики:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = w \cdot (P/P_0)^{n_{\text{роб}}} e^{E/T_1 R} \cdot k_0. \quad (2.28)$$

Величина температури в перерізі частинок рослинної біомаси:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = (\rho \cdot c_{\text{біом}} \cdot x_{1\text{газ}})^{-1} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_{\text{біом}} \cdot x_{1\text{газ}} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial T^*}{\partial t}. \quad (2.29)$$

В одиничному об'єму приріст теплоти дорівнює теплоті, яке витрачається на зміну ентальпії зазначеного об'єму. Отже, в одиничному об'ємі зміна теплоти визначається:

$$\partial Q = \frac{\partial T^*}{\partial t} \partial t (\rho \cdot c \cdot V). \quad (2.30)$$

В одиничному об'ємі зміна теплової енергії є добутком маси біомаси, що вже прореагувала, на тепловий ефект. Тепло парогазової суміші не враховується. Отже, маємо:

$$(\partial m_{\text{біовуг}} - \partial m_{\text{газ}}) Q_{\text{теп.эф.}} - T_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot \partial m_{\text{газ}} = \frac{\partial T^*}{\partial t} \partial t (\rho \cdot c \cdot V). \quad (2.31)$$

Напишемо стехіометричні співвідношення:

- для суміші газів:

$$\frac{\partial m_{\text{газ}}}{\partial t} = (m_0 \cdot v_0) \frac{\partial w}{\partial t}. \quad (2.32)$$

- для біовугілля:

$$\frac{\partial m_{\text{біовуг}}}{\partial t} = (m_0 \cdot [1 - v_0]) \frac{\partial w}{\partial t}. \quad (2.33)$$

- для рослинної біомаси, яка прореагувала:

$$\frac{\partial m_{\text{газ}}}{\partial t} + \frac{\partial m_{\text{біовуг}}}{\partial t} = m_0 \cdot ([1 - v_0] + v_0) \frac{\partial w}{\partial t} = m_0 \frac{\partial w}{\partial t}. \quad (2.34)$$

Щільність одиничного об'єму:

$$\rho = (-m_{\text{газ}} + m_0) \cdot V^{-1}. \quad (2.35)$$

Введемо в рівняння (2.35) масу газів, що утворилися при термічній переробці:

$$\rho = (-w \cdot w_0 \cdot m_{\text{газ}} + m_0) \cdot [(w)^2 \beta \cdot V_0]^{-1}. \quad (2.36)$$

Під час термічного розкладання щільність одиничного об'єму рослинної біомаси:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 - w_0 \cdot w) \cdot [(w)^2 \beta]^{-1}. \quad (2.37)$$

Отже, зміна температури в одиничному об'ємі рослинної біомаси:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} = \partial w \cdot Q_{\text{теп.еф.}} \cdot (1 - w_0 \cdot c_{\text{газ}} \cdot T_{\text{газ}}) \cdot (\partial t \cdot c[1 - w \cdot w_0])^{-1}. \quad (2.38)$$

Перепишемо рівняння (2.29) з врахуванням (2.38):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} = & (\rho \cdot c_{\text{біом}} \cdot x_{1\text{газ}})^{-1} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_{\text{біом}} \cdot x_{1\text{газ}} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \right) + \\ & + \partial w \cdot Q_{\text{теп.еф.}} \cdot (1 - w_0 \cdot c_{\text{газ}} \cdot T_{\text{газ}}) \cdot (\partial t \cdot c[1 - w \cdot w_0])^{-1}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Для визначення коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності, залежно від кількості рослинної біомаси, що прореагувала:

$$\lambda(w) = \lambda_{\text{біом}} + (\lambda_{\text{біовуг}} - \lambda_{\text{біом}}) \cdot w. \quad (2.40)$$

$$c(w) = c_{\text{біом}} + (c_{\text{біовуг}} - c_{\text{біом}}) \cdot w. \quad (2.41)$$

Врахувавши початкові та граничні умови наведемо розв'язок крайової задачі:

$$w(0, x_1) = 0. \quad (2.42)$$

$$T_1(0, x_1) = T_1(t_{\text{біом}} + t_{\text{сушін}}, x_{\text{біом}}). \quad (2.43)$$

Рівняння (2.42-2.43) визначають сумарний потік суміші газопарової з поверхні частинки біомаси під час її термічного розкладання:

$$T_1(0, x_1) = T_1(t_{\text{біом}} + t_{\text{сушін}}, x_{\text{біом}}). \quad (2.44)$$

$$m_{\text{пари}} = (S_{\text{ч.біом.}})^{-1} \frac{dm_{\text{ч.біом.}}}{dt} = m_0 \cdot w_0 \cdot (S_{\text{ч.біом.}} \cdot x_{\text{пари}})^{-1} \int_0^x \frac{\partial w}{\partial t} dx. \quad (2.45)$$

Для видалення летючих рівняння матеріального балансу, коли усі частинки біомаси, що складають дрібнодисперсний шар, перебувають в однакових умовах:

$$m_{\text{пари}} \cdot S \cdot dt - P_{\text{сис.уп.}} \cdot \rho \cdot dt + P_{\text{топ.}} \cdot \rho_{\text{топ.газ}} \cdot dt = \rho \cdot d \cdot V_{\text{віл}} \quad (2.46)$$

Права частина рівняння (2.46) описує зміну маси газопарової суміші, яка перебуває у вільному об'ємі установки. Загалом в лівій частині рівняння (2.46) перший член описує надходження газопарової суміші в піролізний реактор завдяки вивільненню з рослинної біомаси продуктів розкладання; другий – надходження в систему відбирання газопарової суміші; третій – надходження з топки газопарової суміші.

Сума об'ємної продуктивності конденсатора та насоса складає об'ємну продуктивність системи відбирання газопарової суміші:

$$P_{\text{сис.уп.}} = P_{\text{конд.}} + P_{\text{насос.}} \quad (2.47)$$

З рівняння теплового балансу процесу конденсації визначимо продуктивність конденсатора об'ємну:

$$\rho \cdot (t - t_{\text{насос.}}) \cdot c \cdot P_{\text{конд.}} + P_{\text{конд.}} \cdot \rho_{\text{конд.}} \cdot \sum(y_i \cdot r_i) = S_{\text{конд.}} \cdot K \cdot \Delta\tau_{\text{ср}} \quad (2.48)$$

Зміна внутрішньої енергії теплоносія (відбувається коли насичені пари переходять в конденсат, який охолоджується) – це ліва частина рівняння (2.48), в той час відбирання з конденсатора теплоти – права частина рівняння.

$$P_{\text{конд.}} = S_{\text{конд.}} \cdot K \cdot \Delta\tau_{\text{ср}} \cdot [\rho_{\text{конд.}} \cdot \sum(y_i \cdot r_i) + \rho \cdot (t - t_{\text{насос.}}) \cdot c]^{-1} \quad (2.49)$$

Продуктивність системи подачі повітря в систему:

$$P_{\text{сис.под.пов.}} = P_{\text{топ.}} + \text{пари} \cdot S_{\text{конд.}} \cdot \rho^{-1} - P_{\text{конд.}} \quad (2.50)$$

За рівнянням Менделєєва-Клапейрона визначимо щільність суміші (газопарової):

$$\rho = M \cdot P / (TR) \quad (2.51)$$

Після диференціювання рівняння 2.50 набуде наступного вигляду:

$$d\rho = T^{-2} \cdot R^{-1} \cdot M \cdot (T \cdot dP - P \cdot dT) \quad (2.52)$$

Рівняння (диференційне) зміни тиску суміші газопарової над біомасою, яка піролітично розкладається, після відповідних підстановок рівнянь (2.49 – 2.52) в рівняння (2.46) матиме вигляд:

$$\frac{dP}{dt} = R \cdot \left(\text{пари} \cdot S_{\text{конд.}} + P_{\text{топ.}} \cdot \rho_{\text{конд.}} \right) \cdot (V_{\text{віл}} \cdot M)^{-1} \cdot T - P \cdot \left[P_{\text{сис.уп.}} \cdot V_{\text{віл}} - \frac{dT}{dt \cdot T} \right]^{-1} \quad (2.53)$$

Для фази газопарової з рівняння теплового балансу визначимо зміну температурних умов в установці:

$$\begin{aligned} \rho \cdot c \cdot V_{\text{вїл}} \cdot dT = & \alpha \cdot S \cdot (T_{1\text{повїт.}} - T) \cdot dt - T \cdot P_{\text{сис.уп.}} \cdot \rho \cdot c \cdot dt + \\ & + c \cdot S \cdot \text{пари} \cdot T_{1\text{повїт.}} \cdot dt + P_{\text{топ.}} \cdot (\rho_{\text{топ.газ.}} \cdot c_{\text{топ.газ.}}) \cdot T_{\text{топ.}} \cdot dt \end{aligned} \quad (2.54)$$

В лівій частині рівняння (2.54) відображено характер зміни тепловмісту етапу парогазового. В правій частині рівняння описано процеси відведення та підведення теплоти завдяки теплообміну. Друга складова правої частини рівняння (2.54) описує відведення теплоти, яка усувається парами в мережу відбирання. Третя складова правої частини рівняння (2.54) описує надходження теплоти від біомаси, яка піролітично розкладається. Четверта складова правої частини рівняння (2.54) описує надходження теплоти з топки.

Зробивши відповідні перетворення з рівнянням (2.54) виведемо диференційне рівняння зміни для середовища (газопарового) температури:

$$\frac{dT}{dt} = \left[\frac{R \cdot \alpha \cdot S \cdot (T_{1\text{повїт.}} - T) + P_{\text{топ.}} \cdot (\rho_{\text{топ.газ.}} \cdot c_{\text{топ.газ.}}) \cdot T_{\text{топ.}}}{P \cdot V_{\text{вїл}} \cdot M \cdot c} - \frac{P_{\text{сис.уп.}}}{V_{\text{вїл}}} + \frac{R \cdot S \cdot \text{пари} \cdot T_{1\text{повїт.}}}{P \cdot V_{\text{вїл}} \cdot M} \right] \cdot T \quad (2.55)$$

Рівняння (2.55) виведено для визначення температури суміші (газопарової) в піролізній установці.

Модельовання процесу охолодження частинок рослинної біомаси під час піролізу

Процес охолодження біовугілля є наступним після процесу термічного розкладання частинок рослинної біомаси під час піролізу.

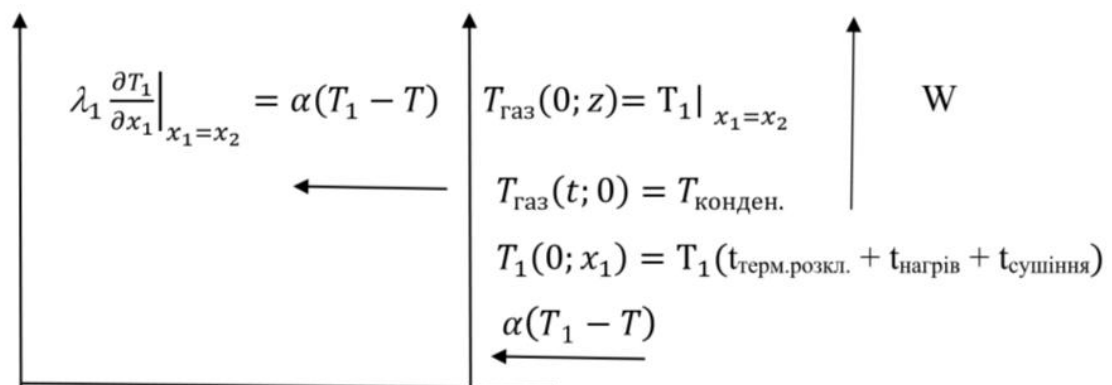


Рис. 2.1. Схема процесу охолодження частинки рослинної біомаси (в

центральної частині)

Охолодження біовугілля здійснюється в реакційній зоні камери піролізу шляхом надходження в шар біовугілля суміші газопарової, яка попередньо в конденсаторі набуває низької температури, і за допомогою системи подачі газів дуття циркулює в камері піролізу піролізної установки. Циркулюючи в шарі біовугілля суміш газопарова перед надходженням в конденсатор забирає з біовугілля частину теплоти. В конденсаторі суміш газопарова охолоджується і знову подається в зону знаходження готового біовугілля. Цикл повторюється доти температура біовугілля не стане близько 55°C.

Процес охолодження, щоб встановити тривалість охолодження біовугілля, відобразимо системою рівнянь. Це є залежності перенесення матеріалу та енергії суміші пари та газів з крайовими умовами.

Крайові умови виразимо наступним чином:

- початкові умови:

$$T_1(0; x_1) = T_1(t_{\text{терм.розкл.}} + t_{\text{нагрів}} + t_{\text{сушіння}}; x_1) \quad (2.56)$$

$$T_{\text{газ}}(0; z_{\text{біовуг.}}) = T_{\text{пари.}} \quad (2.57)$$

- граничні умови:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_2} = \alpha(T_1 - T) \quad (2.58)$$

$$T_{\text{газ}}(t; 0) = T_{\text{конден.}} \quad (2.59)$$

Тепловий баланс охолодження газопарової суміші від конденсатора:

$$S_{\text{конд.}} \cdot k \cdot T \cdot dt = c_{\text{біом.}} \cdot \rho_{\text{біом.}} \cdot V_{\text{віл.}} \cdot dT_{\text{біом.}} \quad (2.60)$$

Права частина рівняння (2.60) є зміною внутрішньої енергії газопарової суміші, а ліва – описує відбирання теплоти з конденсатора. При проходженні через конденсатор зміну температури розпеченого середовища позначимо як:

$$\frac{dT}{dt} = S_{\text{конд.}} \cdot k \cdot T \cdot (c_{\text{біом.}} \cdot \rho_{\text{біом.}} \cdot V_{\text{віл.}})^{-1} \quad (2.61)$$

Тривалість процесу охолодження можна визначити спільним розв'язком рівнянь (2.61) та (2.56). Отже, в розділі 2.2 представлено

математичну модель, яка описує усі складові етапи процесу піролізу рослинної біомаси: нагрівання, сушіння, термічне розкладання і охолодження.

Аналізом результатів математичного моделювання є раціональні методи її оптимізації [37–39], що наведено в розділі 3 цієї роботи.

2.3. Розробка алгоритму розрахунку процесу піролізу різних видів аграрної рослинної біомаси

Алгоритм розробляється з метою розв'язку математичних залежностей для встановлення впливу зовнішніх незалежних параметрів на внутрішні (залежні) процесові параметри. Для реалізації зазначеної задачі використано пакет програм MathCAD Prime.

Розроблено блок-схему, де кожному з етапів процесу піролізу біомаси відповідає свій блок (рис. 1):

- 1) блок розрахунку тривалості етапу нагрівання частинок рослинної біомаси під час процесу піролізу в піролізній установці;
- 2) блок розрахунку тривалості етапу сушіння частинок рослинної біомаси під час процесу піролізу в піролізній установці;
- 3) блок розрахунку тривалості етапу термічного розкладання частинок біомаси під час процесу піролізу в піролізній установці;
- 4) блок розрахунку тривалості етапу охолодження виробленого біовугілля.

Для проведення розрахунків потрібно ввести вхідні дані – фізико-хімічні характеристики аграрної рослинної біомаси та режимні параметри процесу. Наступним кроком визначаємо тривалість етапу нагрівання біомаси, якщо $T_{\text{біомаси}}$ відповідає $T_{\text{волог.термом.}}$, тоді слід переходити до блоку «два» (розрахунок тривалості етапу сушіння частинок біомаси). Потім, аналогічним чином до блоків «три» (термічне розкладання біомаси) та «чотири» (охолодження біовугілля).

Тривалість етапів процесу піролізу визначається виконанням таких умов: поточний вологовміст частинки біомаси ідентичний критичному вологовмісту (етап сушіння); частина біомаси, що прореагувала така ж як частина вмісту летючих в біомасі (етап термічного розкладання); температура біовугілля рівна 55°C (стадія охолодження).

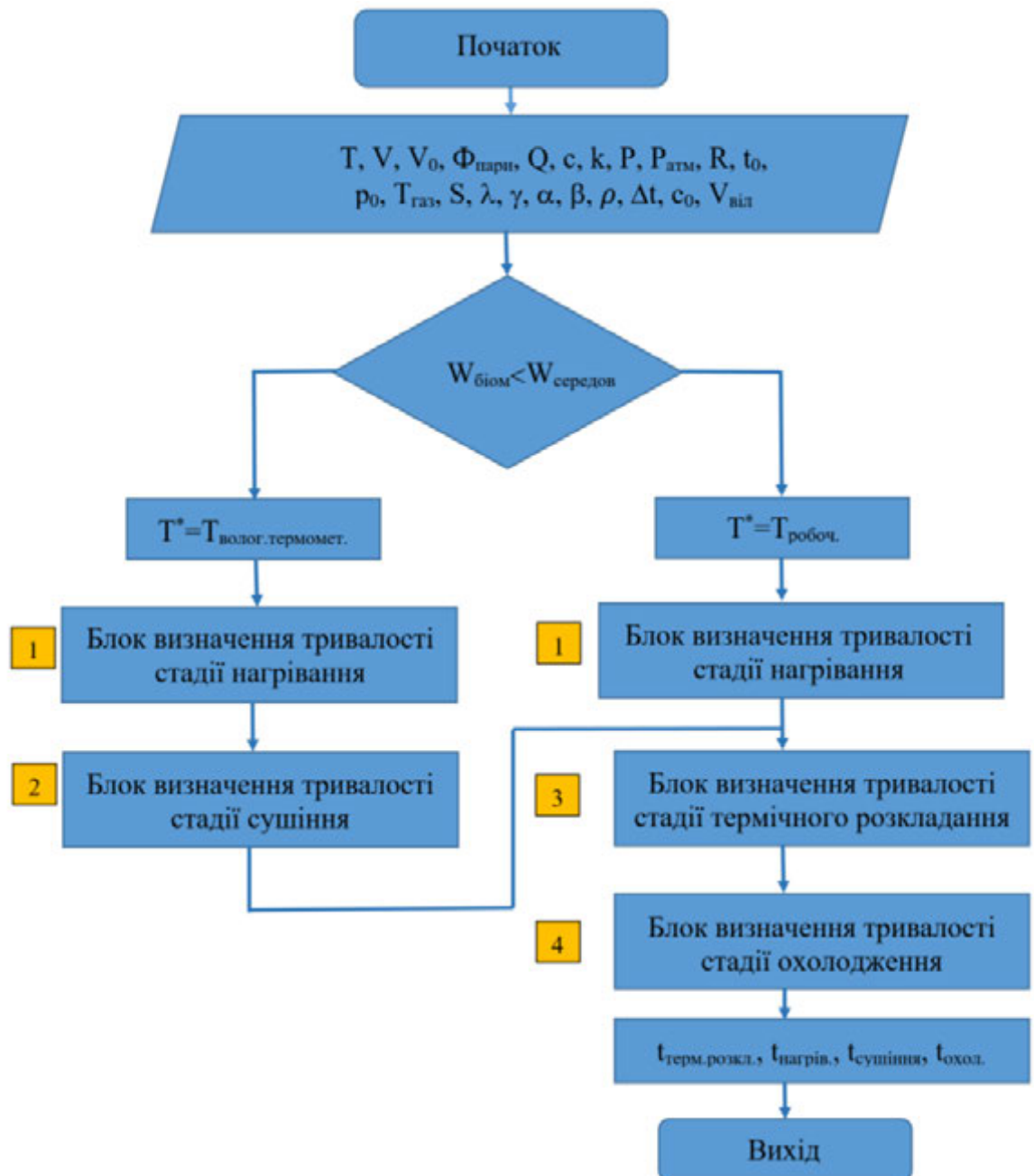


Рис. 1. Блок-схема розрахунку процесу піролітичного розкладання біомаси

Якщо межа гігроскопічності є вищою за вологість біомаси, тоді: визначається тривалість етапу нагрівання до досягнення біомасою температури термічного розкладання, а далі, подібним чином, визначають тривалість етапів термічного розкладання та охолодження біовугілля.

2.4. Висновки до розділу 2

1. Розроблено математичну модель розрахунку всіх етапів процесу піролізу рослинної біомаси. Модель є системою алгебраїчних та диференціальних рівнянь, які комплексно розв'язуються як ціле, бо розподіл параметрів розрахункових в перерізі частинки біомаси, яка піролітично розкладається, наприкінці кожного з етапів для наступного етапу є початковою умовою. Користуючись моделлю можна визначити тривалість процесу хіміко-термічного розкладання рослинної біомаси залежно від характеру теплового поля, розподілу кількості частинок, що прореагували в перерізі біомаси.

2. Складено блок-схему алгоритму розрахунку процесу хіміко-термічного розкладання рослинної біомаси в установці піролізного типу, яка призначена для реалізації математичного моделювання.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ АГРАРНОЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

Мета проведення експериментальних досліджень – спростувати чи підтвердити представлені в роботі результати математичного моделювання щодо встановлення раціональних параметрів процесу піролізу аграрної рослинної біомаси.

Програма експериментальних робіт включає комплекс досліджень, які мають підтвердити гіпотезу магістерської кваліфікаційної роботи: узгодженням режимних та конструкційних параметрів процесу піролізу з фізико-хімічними властивостями біомаси можна підвищити ефективність піролітичного розкладання біомаси та збільшити продуктивність та якість виробленого біовугілля.

Задача дослідження – дослідити кінетику процесу піролізу біомаси та встановити вплив тиску і температури в камері піролізу та вологості зразків біомаси на продуктивність піролізної установки за біовугіллям.

Програма експериментальних досліджень передбачала:

1. Визначення впливу на кінетику протікання процесу піролітичного розкладання рослинної біомаси зовнішніх змінних чинників: тип аграрних залишків з рослинної біомаси; розмір частинок біомаси; вологість біомаси; температурі і тиск в камері піролізу.

2. Визначення впливу тиску і температури в камері піролізу та вологості зразків біомаси на кількість виробленого біовугілля.

В розділі 3 наведено схему та фотозображення експериментальної установки з подальшим описом як принципу її роботи, так і методики проведення досліджень конструкційно-технологічних параметрів процесу піролізу аграрної рослинної біомаси. Під час досліджень також вивчалися

кінетичні криві, які відображають параметри процесу.

Виходячи з аналізу аналітичних та експериментальних даних встановлено раціональні технологічні параметри процесу піролізу аграрної рослинної біомаси та параметри оптимальної конструкції камери піролізу.

3.1. Опис методики проведення та експериментальної установки для піролізу аграрної рослинної біомаси

Для проведення експериментальних досліджень процесу піролізу рослинної біомаси розроблено та виготовлено експериментальну піролізно-газифікаційну установку (рис. 3.1), виготовлену в НУБіП України (м. Київ).

Піролізно-газифікаційна установка складається з двох частин: камери піролізу 3 та газогенератора зворотного процесу газифікації 25. Установка може працювати в двох режимах: виробництво генераторного газу, тоді камера піролізу реалізовує 2 з 4 етапів виробництва синтез-газу, а також в режимі піролізної установки, для виробництва біовугілля. Установка містить корпус 9, який зовні є термоізолюваним утеплювачем 7, та бункера 8 для завантажування рослинної біомаси 4. Для рівномірного надходження біомаси в бункер для сировини 8 передбачено дозувальний пристрій 10. Для відбирання синтез-газу та піролізного газу установка містить патрубки 14 та 17, приєднані до відповідних трубопроводів. Коли установка працює лише в режимі піролізу, то патрубок 14 використовується для забезпечення в камері піролізу потрібно (відповідно до режиму роботи) тиску. При роботі установки зола накопичується в зольнику 28, звідки за допомогою транспортера золи 27 усувається з зольника. В рухомий стан транспортер приводиться за допомогою двигуна 30, вихідний кінець валу якого приєднаний до валу транспортера за допомогою з'єднувальної муфти 29. При роботі установки в режимі газифікації в газогенераторі зворотного процесу газифікації 25 розроблено газо-дутьовий вузол 26 для подачі повітря на процес, яке нагнітається повітрорудкою 31. Швидкість повітря, що надходить

в газо-дугттьовий вузол, фіксувалася анемометром 32.

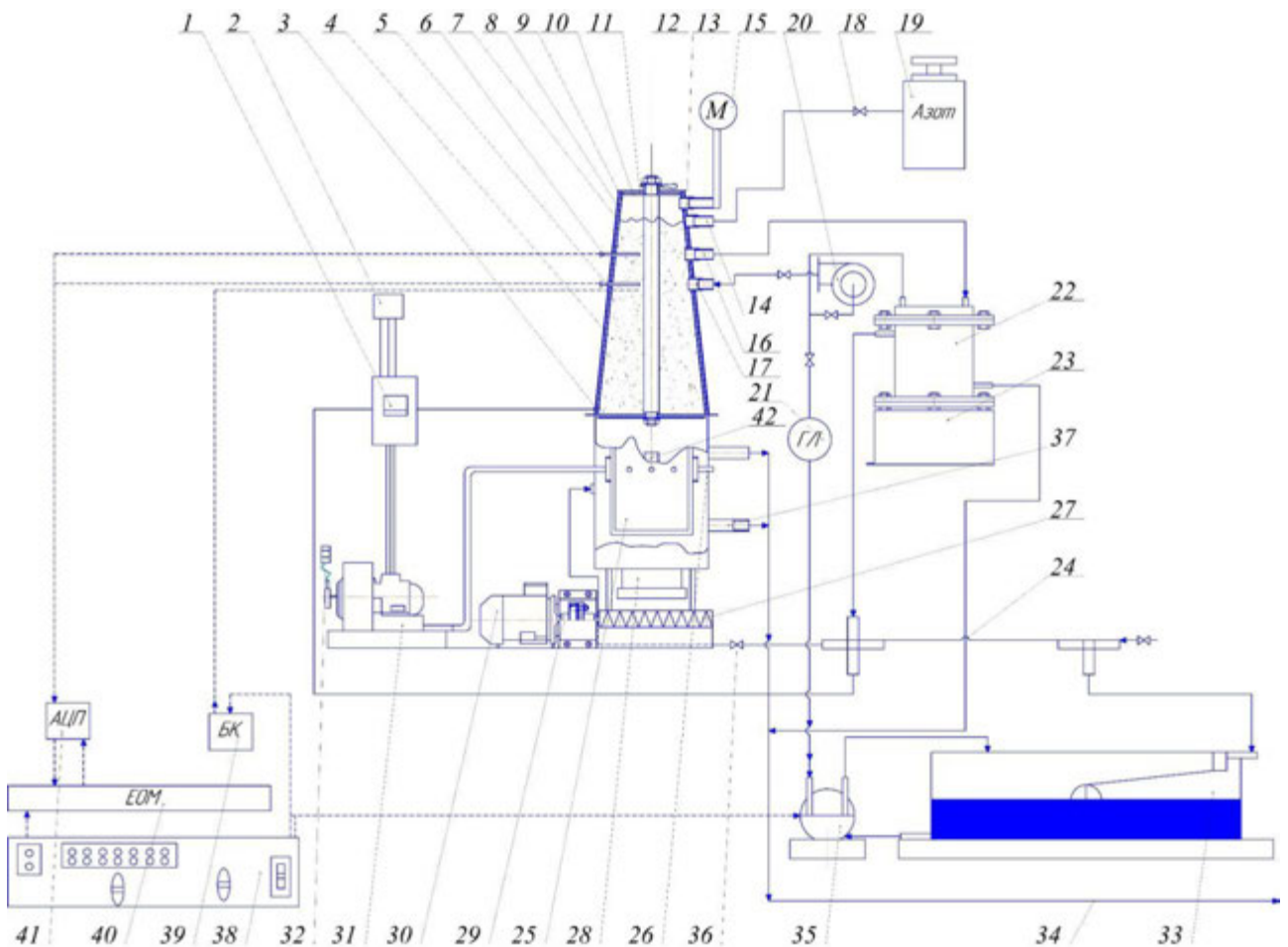


Рис. 3.1. Схема експериментальної піролізно-газифікаційної установки для дослідження процесу піролізу рослинної біомаси: 1 – перетворювач частоти; 2 – джерело електроенергії 0,4 кВ; 3 – камера піролізу; 4 – рослинна біомаса; 5, 6 – термопари; 7 – утеплювач; 8 – бункер; 9 – корпус; 10 – дозувальний пристрій для біомаси; 11 – кришка камери піролізу; 12 – знімне кріплення кришки камери піролізу; 13 – патрубок кріплення манометра; 14 – патрубок створення в камері піролізу режимного тиску; 15 – манометр; 16 – патрубок усунення газів, що не конденсуються; 17 – патрубок продування камери 3; 18, 36, 43 – вентиль; 19 – балон з азотом (інертний газ); 20 – газодувка; 21 – газовий лічильник; 22 – конденсатор кожухотрубчастий; 23 – ємність для збирання конденсату; 24 – трубопровід; 25 – газогенератор зворотного процесу газифікації; 26 – газо-дугттьовий вузол газогенератора (коли установка працює в режимі газифікації); 27 – транспортер золи; 28 – зольник; 29 – муфта; 30 – електродвигун; 31 – повітродувка; 32 – анемометр; 33 – насос водо-кільцевий; 34 – трубопровід системи охолодження; 35 – резервуар накопичувальний; 37 – патрубок зовнішнього контуру системи охолодження; 38 – щиток електророзподільний; 39 – терморегулятор потужності; 40 – ПК; 41 – перетворювач (аналого-цифровий); 42 – електронагрівальний елемент.

Для підключення повітродувки 31 слугує джерело електроенергії 0,4 кВт. Електроенергія від джерела до повітродувки 32 надходить через перетворювач частоти 1. Також в установці присутній електронагрівальний елемент 42 для запуску процесу піролізу. Камера піролізу 3 закривається герметичною кришкою 11. Для можливості автоматизації процесу подачі біомаси в бункер установки передбачено знімне кріплення кришки камери піролізу 12. З метою постійного контролю температури в камері піролізу в процесі роботи в верхній частині цієї камери закріплено дві термомпари 5 та 6. До камери прикріплено патрубки 13 та 14, 16. Коли установка працює в режимі піролізу патрубок 13 слугує для кріплення манометра 15, патрубок 14 – використовується з метою створення в камері піролізу режимного тиску, а патрубок 16 – для усунення газів, що не конденсуються. На рис. 3.1 не зображено, але в нижній частині камера піролізу має патрубок продування камери піролізу 3 в режимі охолодження продукту. Для реєстрації зміни маси сировини, що піролізується, камера піролізу оснащена тензометричним датчиком. Система охолодження камери містить два незалежні контури з трубопроводами 24 та 34, які подають агент охолоджувальний до контурів, а ще в резервуар накопичувальний 35 насоса водо-кільцевого 33. Кількість води, яка подається в різні контури системи охолодження, регулюється системою кранів 18 та 36.

Система відбирання і конденсації суміші газо-парової має послідовно сполучені резервуар накопичувальний 35, насос водо-кільцевий 33, лічильник газовий 21, конденсатор кожухотрубчастий 22 із вбудованою ємністю для збирання конденсату 23. Газовий лічильник 21 здійснює реєстрацію кількості газів, що виділяються в процесі піролізу та не конденсуються. Вентиль 43, вмонтований в трубопровід біля газового лічильника регулює продуктивність водо-кільцевого насоса. Система охолодження містить вентиль 43, конденсатор 22, та газодувки 20. Інформація щодо протікання процесу піролізу накопичується в блоці визначення кінетичних параметрів процесу піролізу. Блок складається з ПК

40, тензодатчика, термопар 5 та 6, нагрівального елемента 42, перетворювача аналого-цифрового 41 та терморегулятора потужності 39. Забезпечення енергією основного обладнання установки та керування системою вакуумування реалізується з щитка 38 (електророзподільного). Реєстрація термопарами 5 та 6 температури піролізу виконувалася з частотою до ста разів на секунду та надходила на обробку до блоку встановлення кінетичних параметрів процесу. Через задані проміжки часу отримана інформація зберігалася в базі даних ПК. Потрібний темп нагрівання біомаси в зоні піролізу задається програмою нагрівання, а керування електронагрівальним елементом 42 виконується регулятором потужності. Усі дані, які реєструються датчиками, обробляють в режимі реального часу та зберігаються в ПК. Після статистичної обробки інформації з датчиків розраховується тривалість етапів процесу та зміна маси брикетів.

Манометр 15 забезпечує фіксацію тиску в камері піролізу (0,1–1 кПа), де до встановленого значення тиск підганяється за допомогою водокільцевого насоса, продуктивність якого керується вентилем 43. У випадку збільшення тиску він нагнітається шляхом використання балону з азотом 19. Продуктивність балону регулюється краном 18.

На початку експериментальних досліджень біомаса (зразок певної вологості та форми геометричної), заздалегідь зважена, поміщалася в камеру піролізу. Обов'язково включався модуль накопичення та зберігання інформації, насоса водокільцевого, система охолодження 37.

Під час піролітичного розкладання біомаси вимірювалася температура в камері піролізу, температура в перерізі зразка біомаси, зміна маси біомаси. Усі вимірювання були реалізовані в часі. Перший етап досліджень передбачав використання зразків біомаси однакового розміру, але різної вологості, яка змінювалася в межах від 10 до 90%. Дослідження вважалося завершеним, коли маса зразка біомаси не змінювалася, що свідчило про те, що процес вивільнення летючих речовин закінчився. Надалі температура біовугілля падала до п'ятдесяти градусів завдяки використанню системи

охолодження установки. Подібним чином досліджено кінетику піролітичного розкладання біомаси залежно від типу біомаси, тиску та температури в камері піролізу. В даному випадку температура була незмінною впродовж усього дослідження. Дослідження залежності кінетики процесу від тиску в камері передбачало фіксацію температури в камері, розмірів зразків біомаси та їх вологості. Кінцевий тиск в камері відображався манометром і регулювався насосом при зміні положення вентиля. Як зразки біомаси використано качани кукурудзи, міскантус та стебла соняшника. З цих видів біомаси вироблялися брикети товщиною 28 мм і довжиною шістдесят міліметрів. Підготовка брикетів до експериментів та вимірювання їх вологості здійснювалося за стандартизованими методиками [37–39].

3.2. Результати досліджень процесу піролізу аграрної рослинної біомаси

Для перевірки адекватності роботи математичної моделі потрібно встановити відповідність її роботи експериментальним даним, що реалізовувалося за методиками [40]. Експериментальні дані оброблялися методами математичної статистики. Результати досліджень як аналітичних так і експериментальних представлені на графіках, на яких експериментальні дані позначені точками, а аналітичні розрахункові дані відображені суцільними лініями. Аналітичні розрахунки виконувалися за блок-схемою рис. 2.2 і математичними залежностями (2.1–2.61). Експериментальні дані отримані із використанням установки рис. 3.1. Похибка між розрахунковими і експериментальними даними не перевищує 10%, що свідчить про високу ступінь адекватності математичної моделі.

Кінетична крива (рис. 3.2) впливу тривалості процесу піролізу на зміну маси зразка з рослинної біомаси умовно може бути представлена у вигляді трьох частин: частина, яка відповідає за процес сушіння зразка з рослинної біомаси (CE), частина, що відповідає за процес термічного розкладання (EF)

та частина, яка показує процес термічного доведення біовугілля (GK). За рахунок випаровування води відбувається зміна маси зразка.

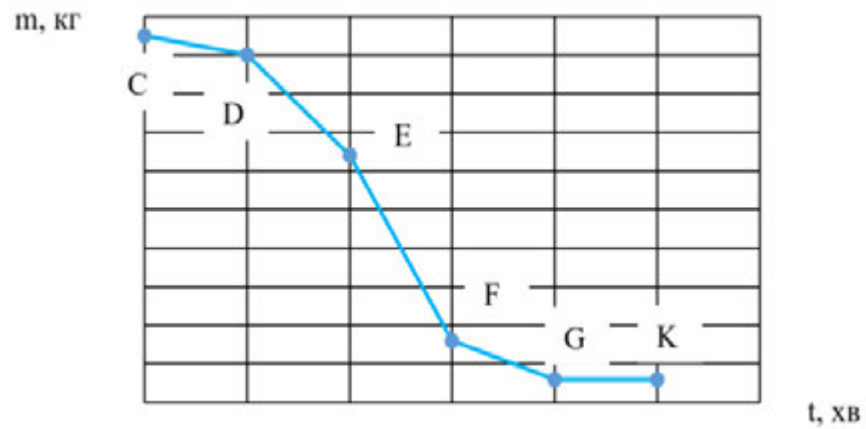


Рис. 3.2. Кінетична крива впливу тривалості процесу піролізу на зміну маси зразка з рослинної біомаси

Частина, яка відповідає процесу сушіння біомаси на рис. 3.2 чітко виражена, оскільки вологовміст біомаси є вищим за межу насичення стінок клітини зразка. Етап термічного розкладання починається коли починається передчасне перегрівання поверхні частинок біомаси при їх вологовмісті нижче межі гігроскопічності. При цьому прискорюється процес зміни маси зразка зі сталою швидкістю (частина EF). Кінець процесу виробництва біовугілля (частина кривої GK) протікає майже без зміни маси паливної біомаси, оскільки таке явище відбувається за рахунок десорбції адсорбованих продуктів (рідких та газоподібних) процесу піролізу.

Дослідимо вплив на кінетику протікання процесу піролітичного розкладання рослинної біомаси зовнішніх змінних чинників: тип аграрних залишків з рослинної біомаси; розмір частинок біомаси; вологість біомаси; температури і тиск в камері піролізу.

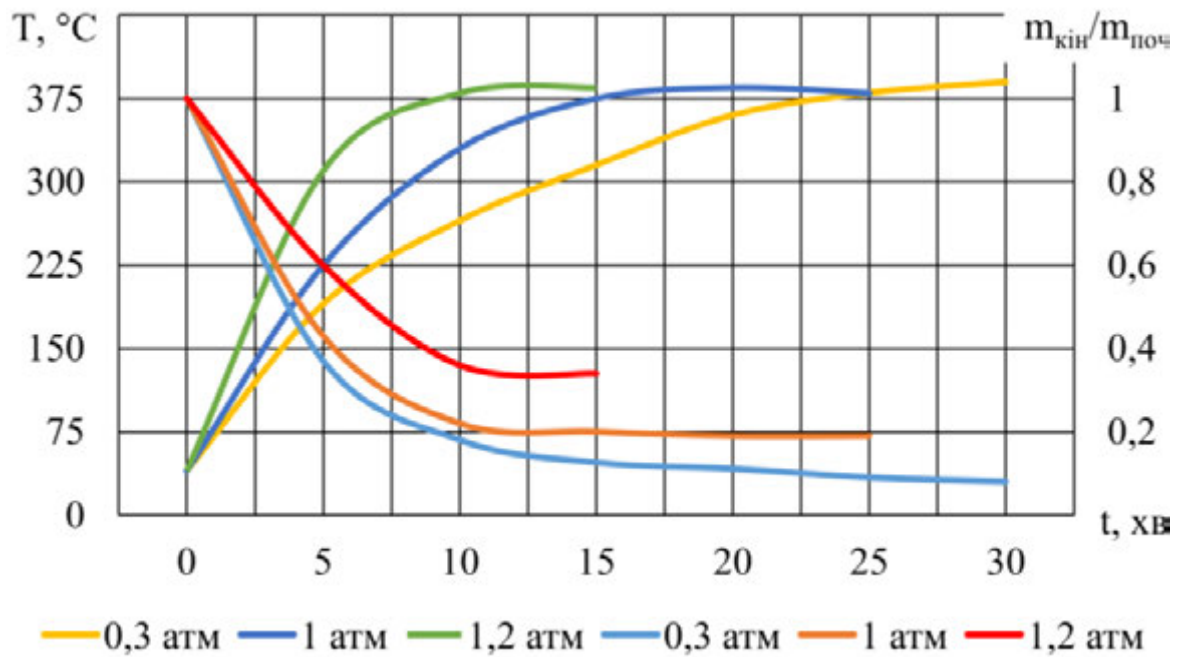


Рис. 3.3. Кінетичні криві, які відображають вплив тиску середовища на зміну маси біомаси та температури

Згідно з рис. 3.3 тривалість процесу піролізу зменшується із зростанням тиску в камері піролізу, при цьому кількість виробленого біовугілля збільшується. Із зниженням тиску в системі кількість біовугілля зменшується при сталому зростанні тривалості процесу. Коли тиск в камері зростає скорочення тривалості піролітичного розкладання свідчить про ріст температури та швидкості термохімічної реакції. Час перебування продуктів хімічних реакцій теж збільшується, що, в свою чергу, сприяє повній карбонізації біомаси. Сповільнення термохімічних реакцій має місце при інтенсивному відведенні теплоти продуктів хімічних реакцій, коли температура палива з біомаси знижується при зменшенні тиску в камері піролізу.

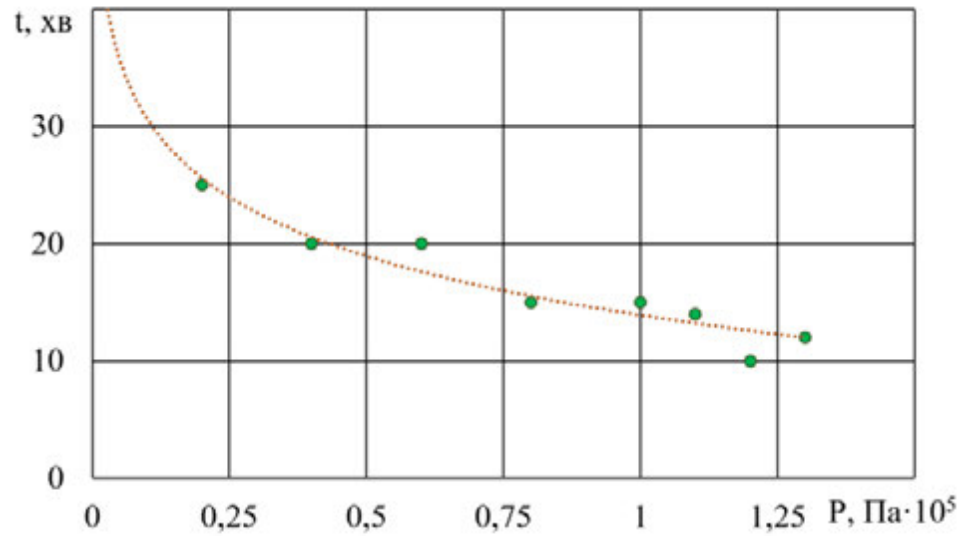


Рис. 3.4. Залежність впливу тиску в камері піролізу на тривалість процесу

Характер залежностей тривалості процесу розкладу біомаси залежно від тиску середовища можна встановити за результатами аналітичних та експериментальних досліджень, які представлені на рис. 3.4 та рис. 3.5 (зміна маси палива з біомаси та температури середовища залежно від тиску в камері піролізу).

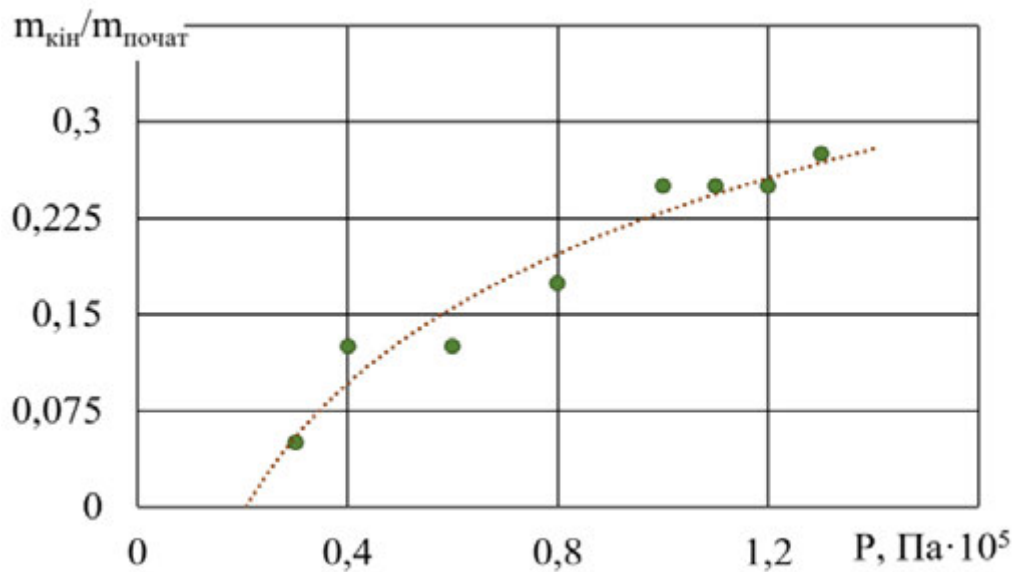


Рис. 3.4. Залежність впливу тиску в камері піролізу на кількість виробленого біовугілля

Згідно залежності 3.4 тривалість процесу піролізу суттєво зростає при зменшенні тиску в камері піролізу. За рис. 3.5 можна свідчити, що кількість виробленого біовугілля зростає із збільшенням тиску в камері піролізу. Кількість біовугілля збільшується до граничного значення рівного, масовій долі С в паливі з рослинної біомаси.

Як впливає з рис. 3.5 тривалість процесу піролізу зростає із зростанням початкової вологості біомаси (криві впливу вологості на зміну маси та температури). Саме частина діаграми, що відповідає термічному розкладанню біомаси найбільш залежна від вологості сировини. Швидкість зміни маси палива з біомаси тим нижча, наскільки вищим є вологовміст, що обґрунтовується витратами теплоти на нагрівання та фазове перетворення вологи (залишкової) під час термічного розкладання біомаси в камері піролізу. Графічно форма частини кривої (кінетичного характеру) змінюється із опуклої (волога біомаса) на ввігнуту (суха біомаса). Кількість виробленого готового продукту (біовугілля) від вихідної вологості біомаси практично не залежить.

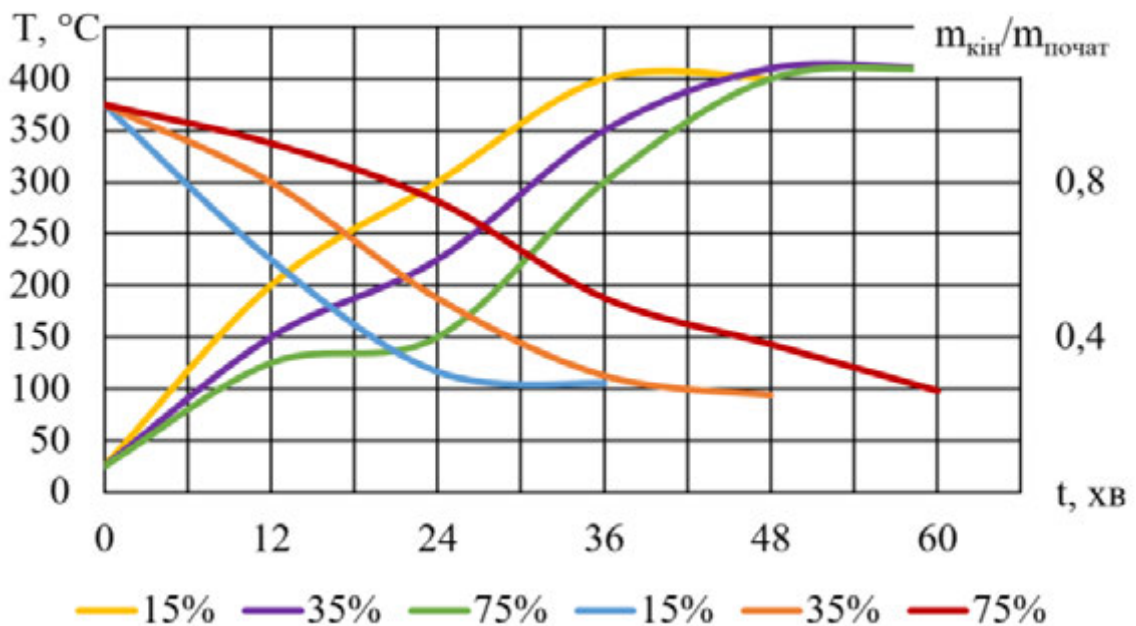


Рис. 3.5. Кінетичні криві впливу вологості палива з біомаси на зміну температури і маси палива

Згідно рис. 3.5 з менш вологої біомаси через високу інтенсивність протікання термохімічних реакцій біовугілля матиме гірші механічні властивості.

Специфіку характеру впливу вихідної вологості на тривалість процесу піролізу біомаси можна передбачити виходячи з аналізу кінетичних кривих впливу вологості біомаси на зміну її маси і температури середовища (рис. 3.5).

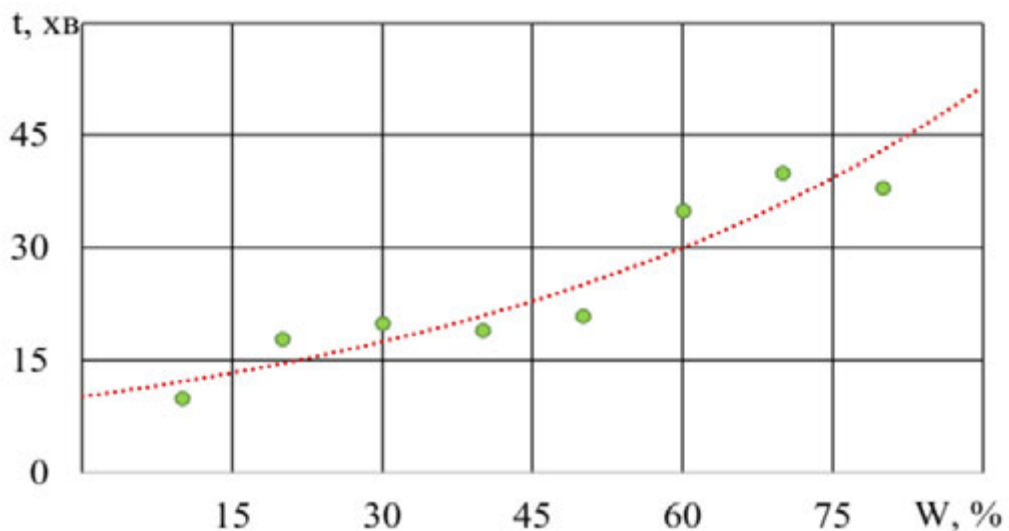


Рис. 3.6. Залежність впливу вихідної вологості біомаси на тривалість процесу піролізу

За залежністю 3.6 впливу вихідної вологості біомаси на тривалість процесу піролізу можна зробити висновок, що тривалість процесу піролізу рослинної біомаси зростає із збільшенням значення її початкової вологості.

Для різних видів аграрної рослинної біомаси на рис. 3.7 наведено залежності (кінетичного характеру) впливу зміни їх маси та температури на загальну тривалість процесу піролізу та кількість виробленого біовугілля. Для біомаси з більш щільною структурою (міскантус гігантеус) кількість виробленого біовугілля і загальна тривалість процесу є вищою, ніж для біомаси з нижчою щільністю (качани кукурудзи, стебла соняха). Більша тривалість процесу піролізу біомаси з високою щільністю спричинена тим,

що при більш щільному розташуванні волокон лігніну обмежується вільний рух продуктів термічної реакції. Також щільна біомаса має вищу теплопровідність, що зменшує температурний градієнт при процесі піролізу.

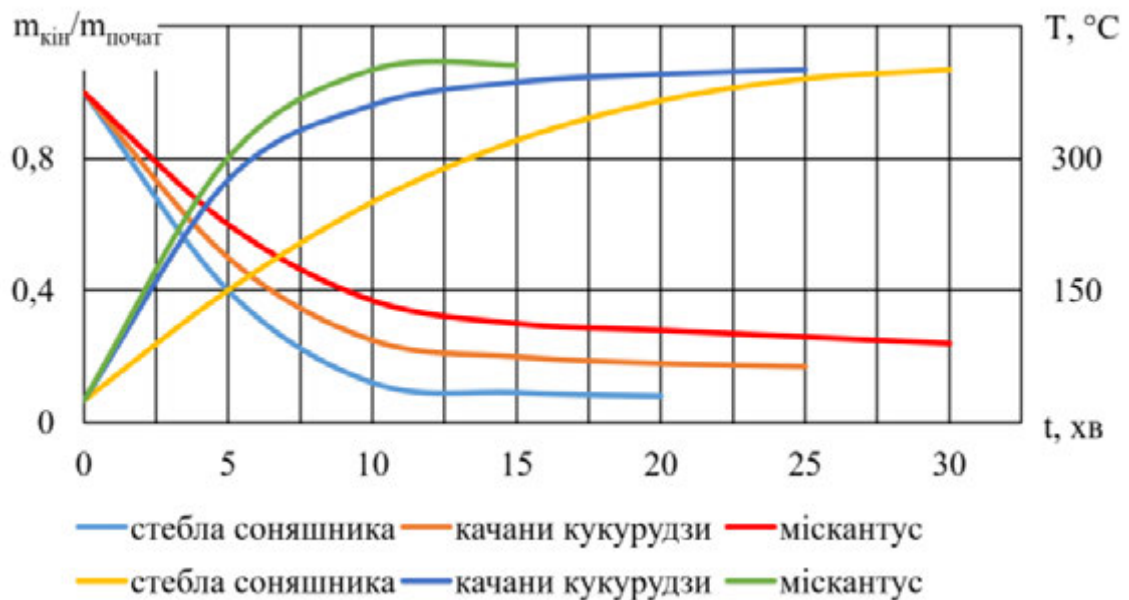


Рис. 3.7. Залежність впливу виду біомаси на характер зміни температури середовища та ступінь втрати маси рослинною сировиною при піролізі

Кількість виробленого біовугілля та тривалість процесу піролітичного розкладання біомаси можна визначити аналізуючи криві (кінетичного характеру) зміни температури та маси палива з біомаси, а також встановити характер таких залежностей.

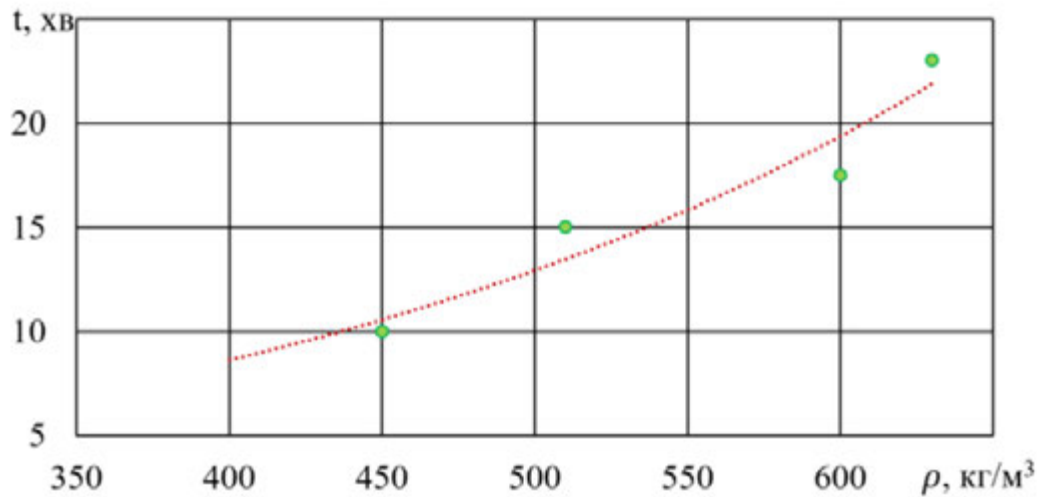


Рис. 3.8. Залежність впливу щільності рослинної біомаси на тривалість процесу її піролітичного розкладання

Аналізуючи рис 3.8 (залежність впливу щільності рослинної біомаси на тривалість процесу її піролітичного розкладання) зробимо висновок, що тривалість процесу піролізу рослинної біомаси зростає із підвищенням щільності біомаси. Кількість виробленого біовугілля також зростає при вищій щільності біомаси (рис. 3.9), що пояснюється більшим вмістом в біомасі з високою щільністю вуглецю.

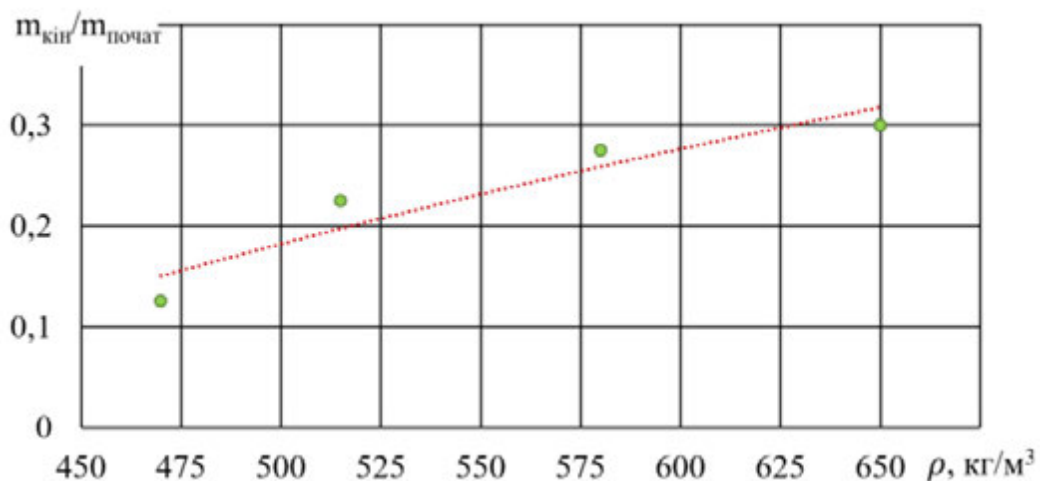


Рис. 3.9. Залежність впливу щільності рослинної біомаси на кількість виробленого біовугілля

Залежність впливу температури в камері піролізу на зміну маси та температури біомаси, яка підлягає піролітичному розкладанню.

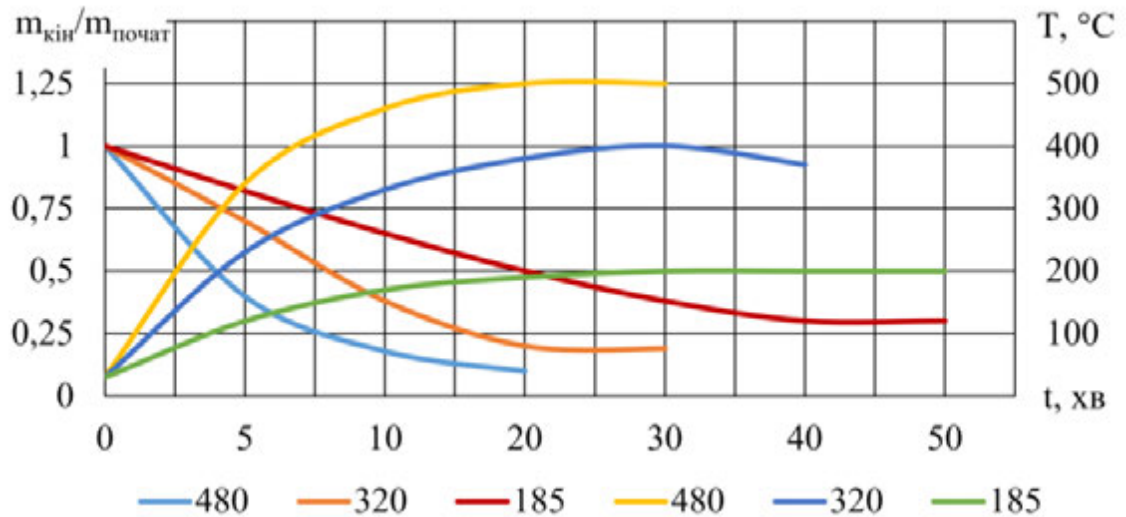


Рис. 3.10. Залежність, яка відображає вплив температури в камері піролізу на зміну маси та температури біомаси, яка піролітично розкладається

За рис. 3.10 кількість виробленого біовугілля та тривалість процесу піролізу знижуються за умови зростання температури в камері піролізу.

Графічна залежність, яка відображає вплив розміру частинок біомаси на зменшення їх маси та температури представлена на рис. 3.11.

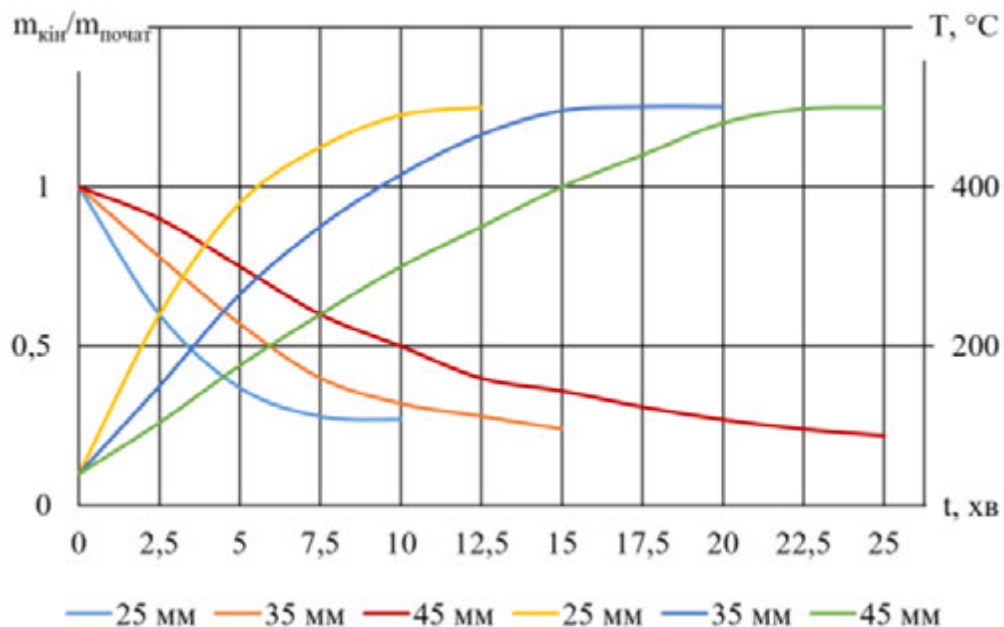


Рис. 3.11. Залежність впливу розміру палива з біомаси на зміну його маси та температури під час процесу піролізу

За результатами досліджень (аналітичних та експериментальних)

встановлено вплив розміру частинок палива з біомаси на тривалість усього процесу піролізу (рис. 3.12).

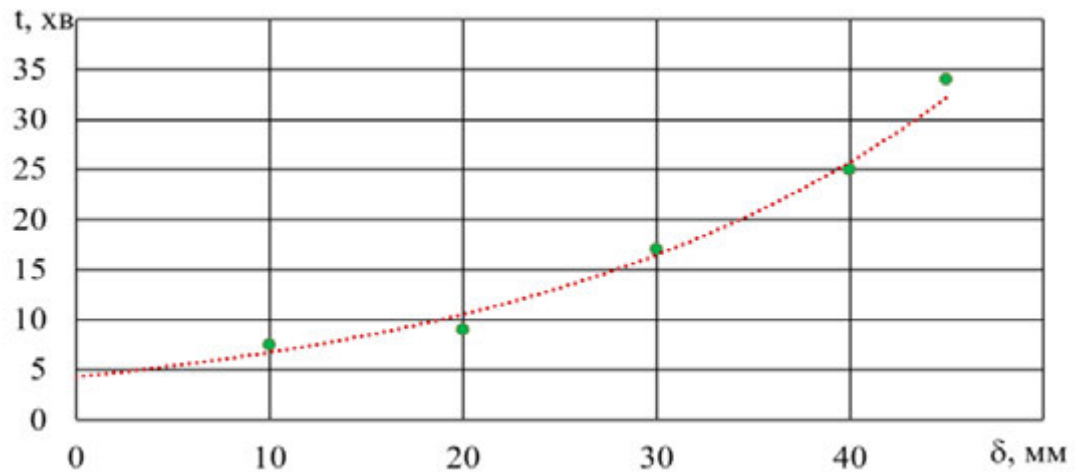


Рис. 3.12. Залежність, яка характеризує вплив розміру палива з біомаси на тривалість процесу піролізу цього палива

Згідно з рис. 3.12 від розміру палива з біомаси тривалість процесу піролізу цього палива має експоненціальну залежність. Також в рамках досліджень було встановлено вплив різних параметрів процесу на зміну коефіцієнта термічної усадки палива з біомаси (рис. 3.13).

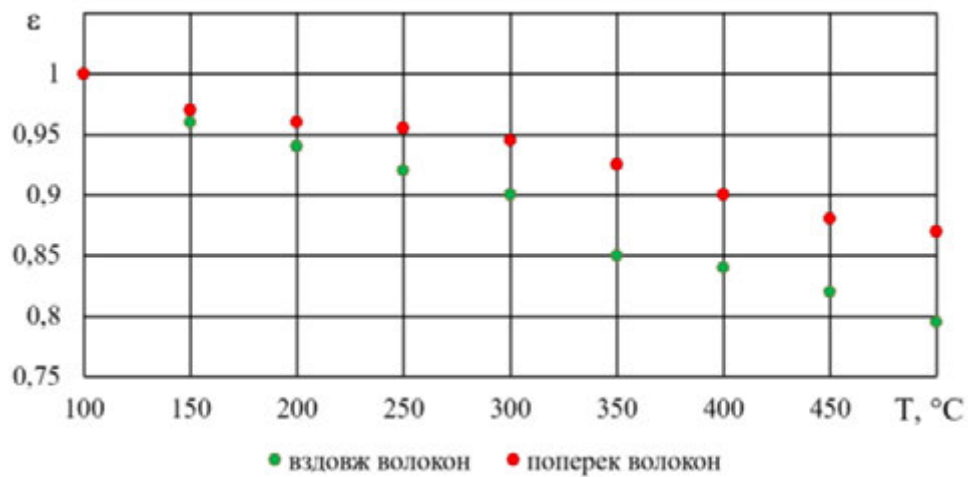


Рис. 3.13. Вплив температури в камері піролізу на коефіцієнт термічної усадки аграрної рослинної біомаси

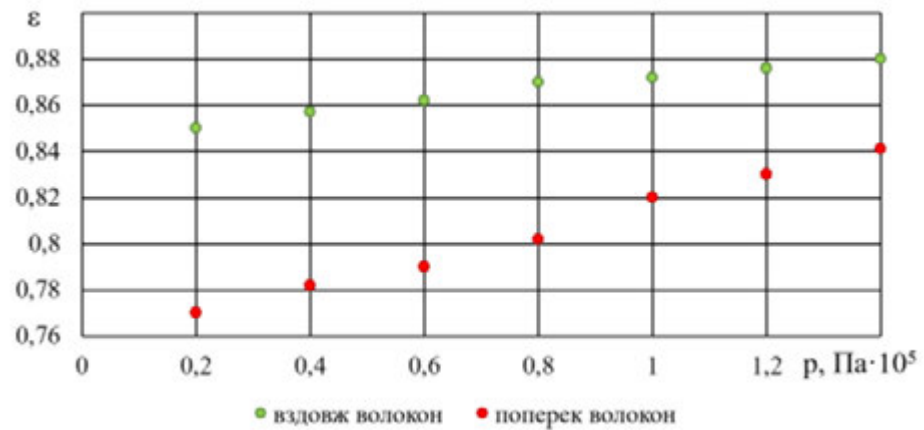


Рис. 3.14. Вплив тиску в камері піролізу на коефіцієнт термічної усадки аграрної рослинної біомаси

За рис. 3.13 збільшення ε в перерізах частинок палива з біомаси мають місце при збільшенні температури в камері піролізу. В повздовжньому напрямку ε є меншою за поперечний напрямок волокон. За рис. 3.14 при зменшенні тиску в камері піролізу зменшується ε . В повздовжньому напрямку ε є меншою за поперечний напрямок волокон.

3.3. Результати експериментальних досліджень впливу тиску і температури в камері піролізу та вологості зразків біомаси на кількість виробленого біовугілля

Метою проведення багатофакторного експерименту було встановити вплив тиску і температури в камері піролізу та вологості зразків біомаси на кількість виробленого біовугілля з високими механічними властивостями. Встановлення зв'язку між незалежними факторами (P , T , W) і залежним (n), встановлення специфіки зазначеного зв'язку і вибір відповідної математичної залежності є методом реалізації багатофакторного експерименту. Зазначимо інтервали варіювання факторів:

1. Тиск в камері піролізу P для реалізації процесу піролізу визначено виходячи з попередніх досліджень (рис. 3.4). Діапазон значень тиску на процес піролізу складатиме: $(0,8 - 1,4) \cdot 10^5$ Па. Значення тиску в камері піролізу P на процес піролітичного розкладання біомаси: $0,8; 1,1; 1,4 \cdot 10^5$ Па.

2. Рівні варіювання вологості W аграрної рослинної біомаси задля забезпечення повноти її розкладання під час процесу піролізу і забезпечення заданої якості біовугілля наступні: 12; 26; 40 %.

3. Рівні варіювання температури в камері піролізу вибрано виходячи з попередніх розрахунків (рис. 3.3, 3.5, 3.10, 3.11) і склали: 300 мм; 400 мм; 500 мм.

Таблиця 3.1

Межі варіювання факторів при визначенні кількості виробленого біовугілля

Рівень варіювання фактору	Тиск в камері піролізу $P \times 10^5$, Па	Вологість біомаси W , %	Температура в камері піролізу T , °С.
Нижній рівень (-)	0,8	12	300
Основний рівень (0)	1,1	26	400
Верхній рівень (+)	1,4	40	500

Кодування факторів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Кодування факторів експерименту

Фактор	Позначення
Тиск в камері піролізу $P \times 10^5$, Па	X_1
Вологість біомаси W , %	X_2
Температура в камері піролізу T , °С	X_3

План 2-го порядку на кубі типу Бокса-Бенкіна обрано для отримання моделей процесу піролізу у вигляді поліномів 2-го ступеню [41, 42].

Масив даних кількості виробленого біовугілля маємо в результаті досліджень, який наведено в табл. 3.3.

Значення коефіцієнтів регресії: $b_0=0,535$; $b_1=0,136$; $b_2=0,038$; $b_3=0,021$; $b_{12}=-0,0017$; $b_{13}=0,007$; $b_{23}=-0,008$; $b_{11}=-0,039$; $b_{22}=0,03$; $b_{33}=-0,007$.

Статистична обробка даних була виконана в програмі “Statistica 16”.
Однорідність дисперсії перевіряли за критерієм Кохрена.

Оскільки $G_{розр}=0,27 < G_{табл}(0,05; 15; 2)=0,4$ процес є відтворюваним.

Критерій Стюдента застосовували для визначення довірчих інтервалів регресійних коефіцієнтів. Табличне значення критерію Стюдента становить $t=4,3$ при кількості ступенів свободи відтворюваності дисперсії $f_1=2$ та 5 % рівні значущості [41, 42]. Рівняння регресії:

$$n=0,535+0,136 \cdot X_1+0,038 \cdot X_2+0,021 \cdot X_3-0,0017 \cdot X_1 \cdot X_2+ \\ +0,007 \cdot X_1 \cdot X_3-0,008 \cdot X_2 \cdot X_3-0,039 \cdot X_1^2+0,03 \cdot X_2^2-0,007 \cdot X_3^2, \quad (3.1)$$

де n – кількість біовугілля, виробленого в процесі піролізу, кг;

X_1 – кодоване значення тиску в камері піролізу $P \times 10^5$, Па;

X_2 - кодоване значення вологості біомаси W , %;

X_3 – кодоване значення температури в камері піролізу T , °С.

Таблиця 3.3

Матриця планування багатофакторного експерименту

№	План експерименту				Результати експерименту				Перевірка адекватності моделі		
	X_0	X_3	X_2	X_1	n_3	n_2	n_1	$n_{ср.}$	$n_{ср.р.}$	$(n_{ср.} - n_{ср.р.})$	$(n_{ср.} - n_{ср.р.})^2$
1	+	0	0	0	0,675	0,686	0,697	0,686	0,672	0,014	0,0001921
2	+	-	-	0	0,616	0,585	0,588	0,596	0,599	-0,003	0,0000078
3	+	+	-	0	0,423	0,386	0,409	0,406	0,403	0,003	0,0000078
4	+	-	+	0	0,297	0,322	0,310	0,310	0,324	-0,014	0,0001921
5	+	+	+	0	0,501	0,493	0,507	0,500	0,535	-0,035	0,0012358
6	+	0	0	0	0,641	0,661	0,672	0,658	0,654	0,004	0,0000176
7	+	-	0	-	0,585	0,588	0,591	0,588	0,599	-0,011	0,0001103
8	+	+	0	-	0,375	0,378	0,381	0,378	0,368	0,010	0,0001102
9	+	-	0	+	0,333	0,336	0,339	0,336	0,340	-0,004	0,0000176

10	+	+	0	+	0,596	0,602	0,608	0,602	0,535	0,067	0,0044325
11	+	0	0	0	0,571	0,574	0,568	0,571	0,582	-0,011	0,0001254
12	+	0	-	-	0,532	0,560	0,588	0,560	0,557	0,003	0,0000122
13	+	0	+	-	0,512	0,518	0,524	0,518	0,522	-0,004	0,0000123
14	+	0	-	+	0,465	0,476	0,487	0,476	0,465	0,011	0,0001254
15	+	0	+	+	0,510	0,498	0,504	0,504	0,535	-0,031	0,0009874

Критерій Фішера використовувався для перевірки відповідності гіпотези отриманому рівнянню регресії. Розрахункове значення критерію Фішера склало $F_{розр}=7,02$. При цьому дисперсія відтворюваності експерименту становить $S_y^2=1,18$, а дисперсія неадекватності $S_{неад}^2=0,46$.

За [42] $F_{табл}(0,05; f_1; f_2)=19,38$, де $f_2=8$, а $f_1=2$. Так як $F_{розр}=12,098 < F_{табл}(0,05; f_1; f_2)=19,38$, то рівняння регресії є правильним. Коефіцієнт детермінації $R^2=0,879$. Рівняння регресії в остаточному варіанті:

$$n=0,535+0,136 \cdot P+0,038 \cdot W+0,021 \cdot T-0,0017 \cdot P \cdot W+ \\ +0,007 \cdot P \cdot T-0,008 \cdot W \cdot T-0,039 \cdot P^2+0,03 \cdot W^2-0,007 \cdot T^2 \quad (3.2)$$

де n – кількість біовугілля, виробленого в процесі піролізу, кг;

P – значення тиску в камері піролізу, $\times 10^5$ Па;

W – значення вологості біомаси, %;

T – значення температури в камері піролізу, $^{\circ}\text{C}$.

У графічному вигляді дану залежність наведено на рис. 3.15–3.23.

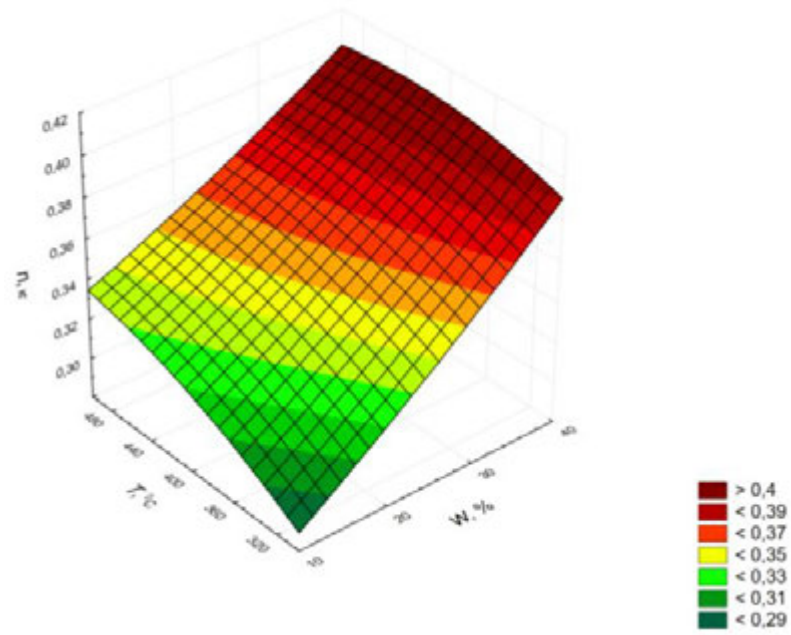


Рис. 3.15. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталому тиску в камері піролізу $P=0,8 \cdot 10^5$ Па, при змінних W та T .

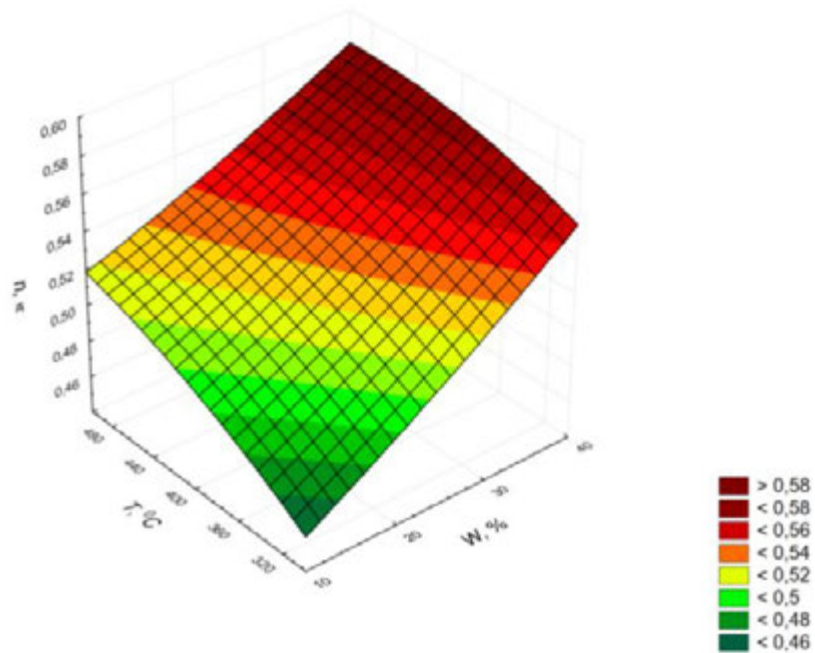


Рис. 3.16. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталому тиску в камері піролізу $P=1,1 \cdot 10^5$ Па, при змінних W та T .

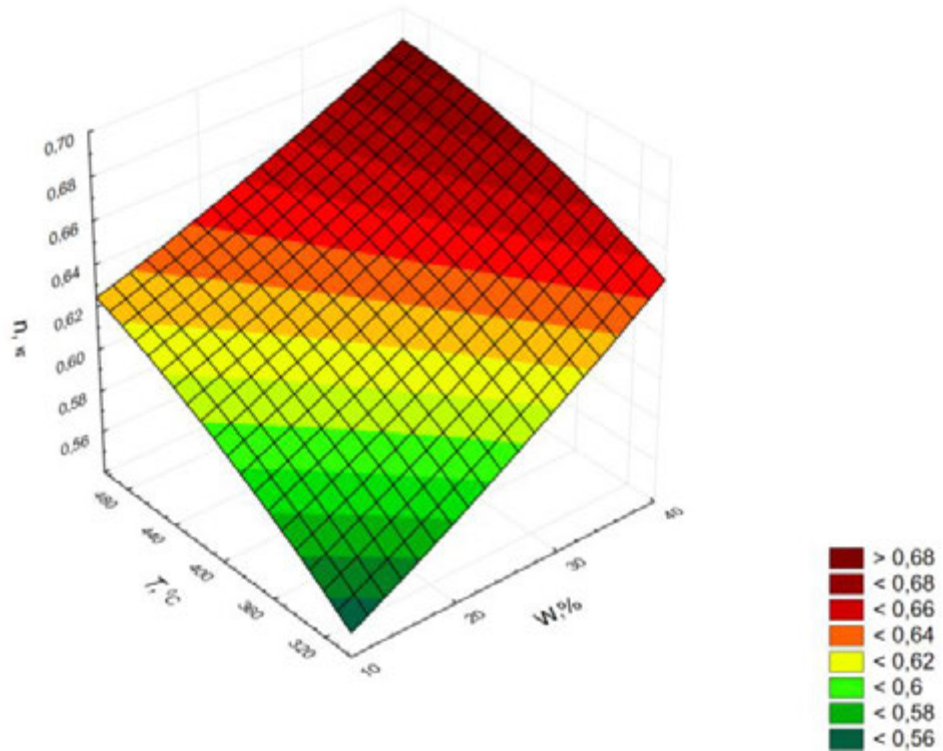


Рис. 3.17. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталому тиску в камері піролізу $P=1,4 \cdot 10^5$ Па, при змінних W та T .

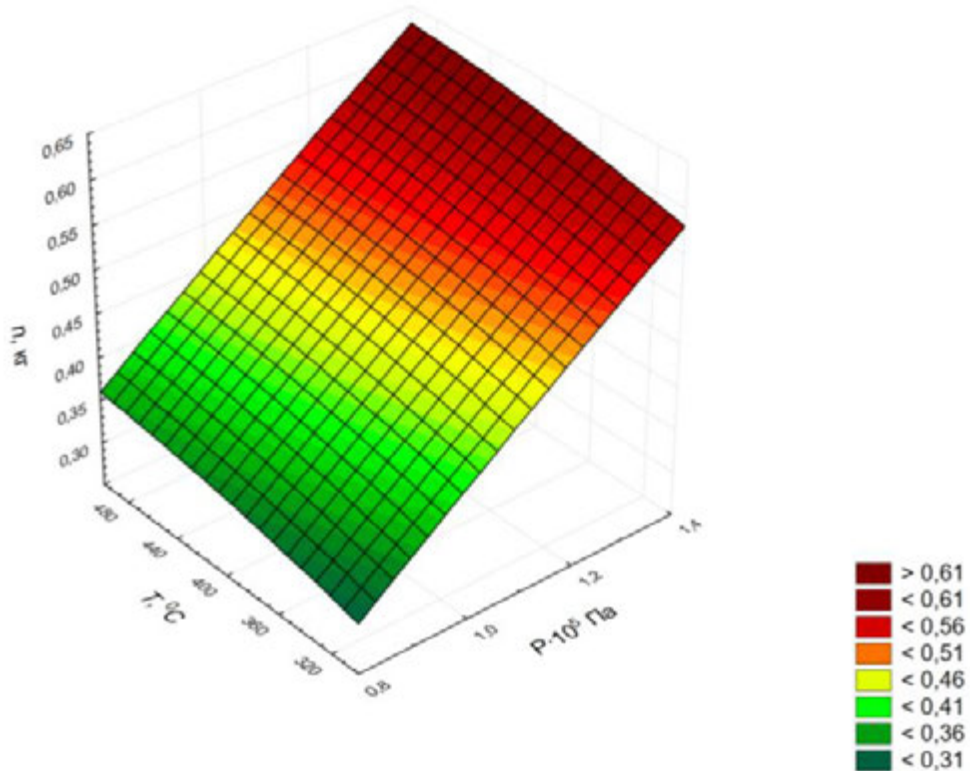


Рис. 3.18. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталій вологості $W=12\%$ та при змінних P та T .

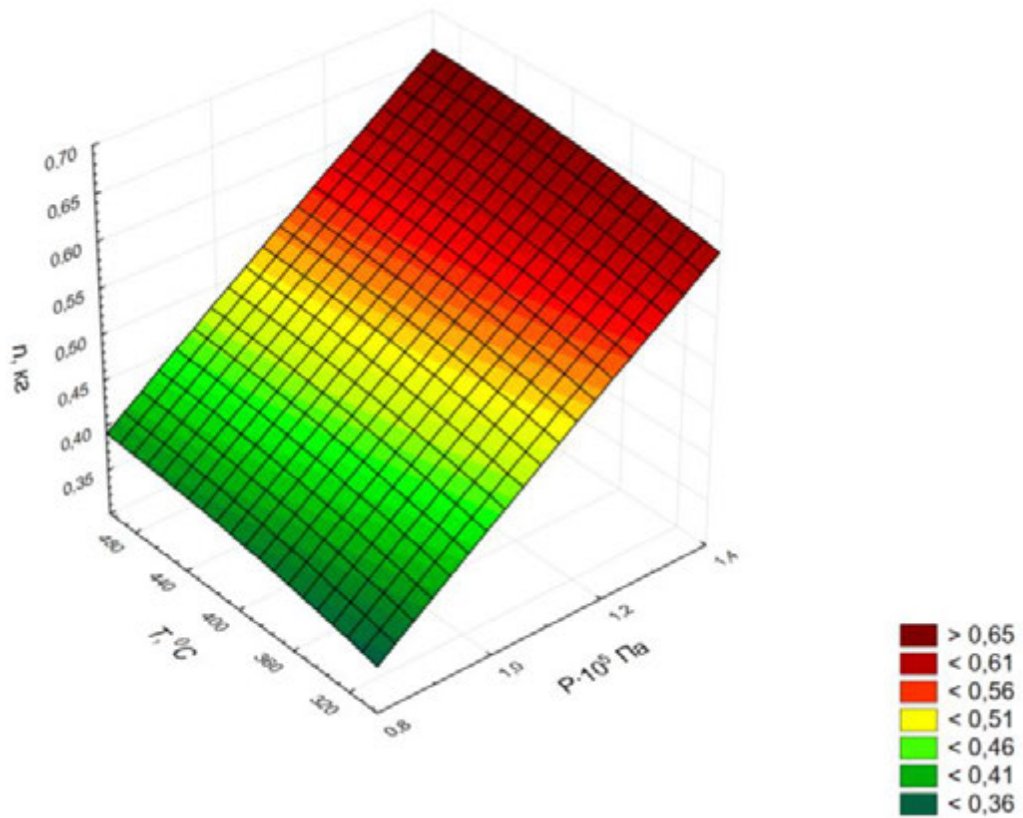


Рис. 3.19. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталій вологості $W=26\%$ та при змінних P та T .

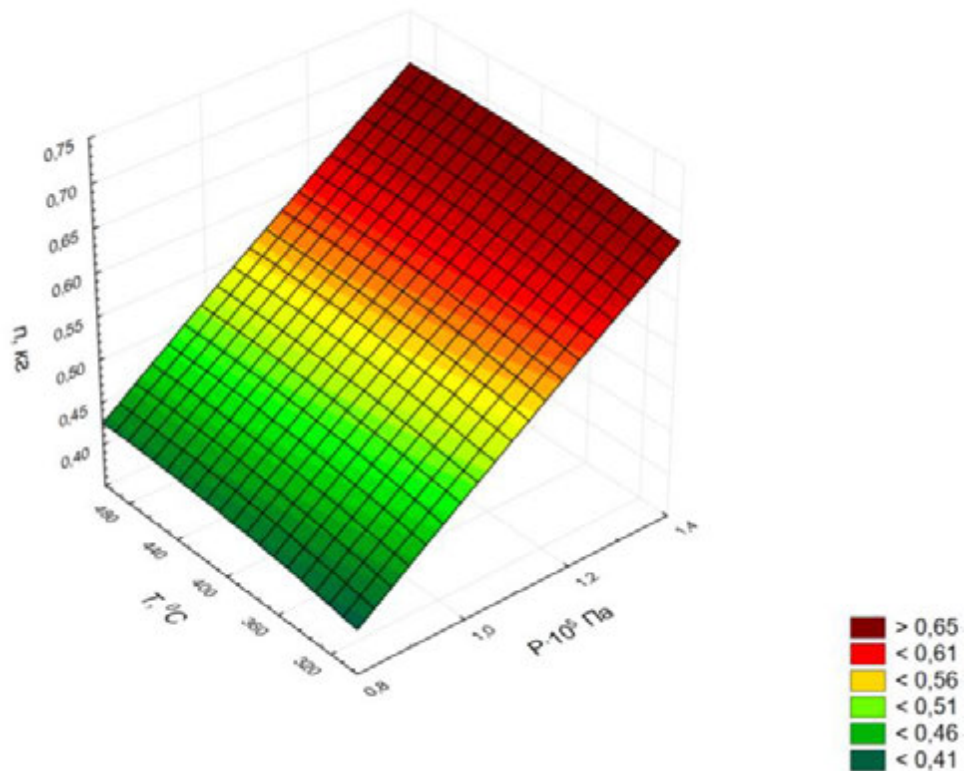


Рис. 3.20. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталій вологості $W=40\%$ та при змінних P та T .

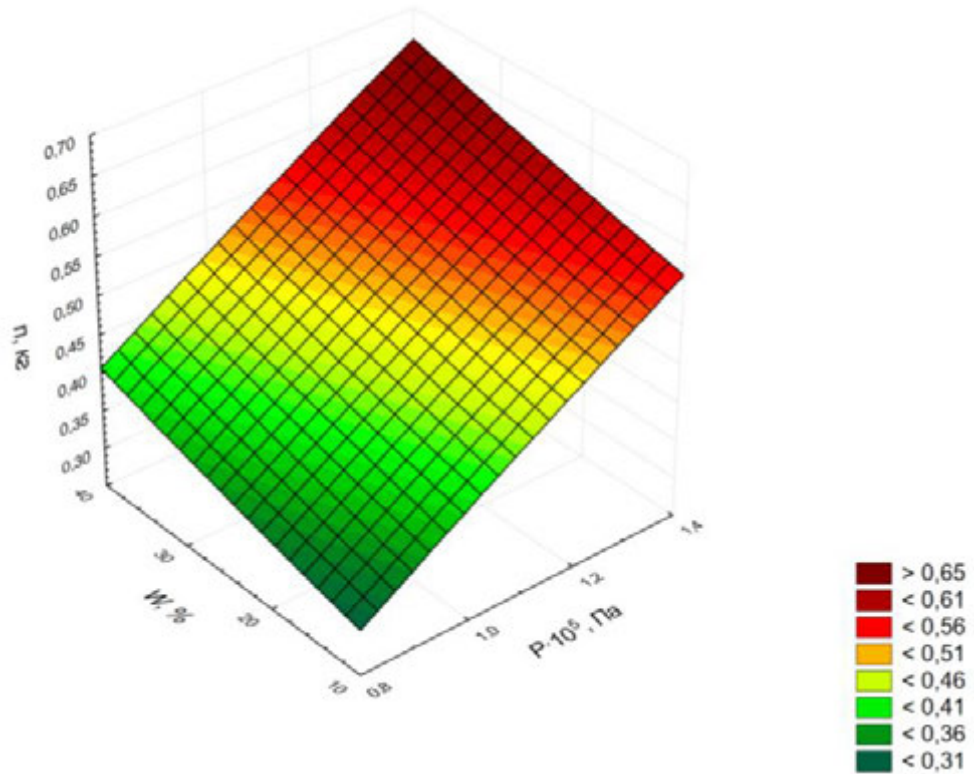


Рис. 3.21. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталій температурі $T=300^\circ\text{C}$ та при змінних P та W .

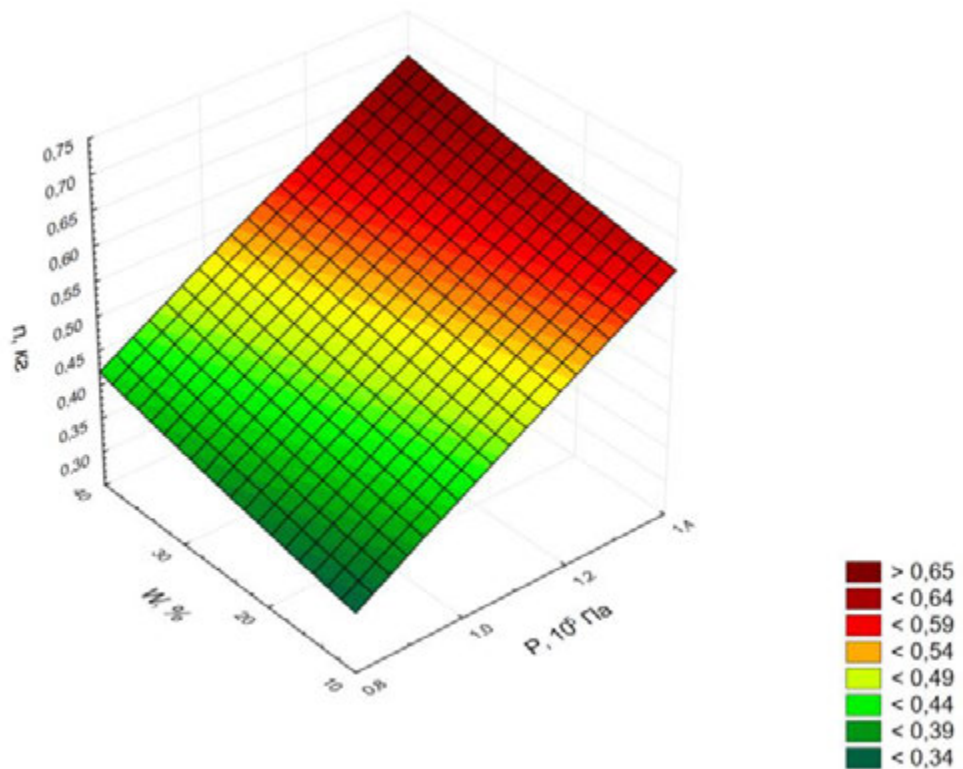


Рис. 3.22. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталій температурі $T=400^\circ\text{C}$ та при змінних P та W .

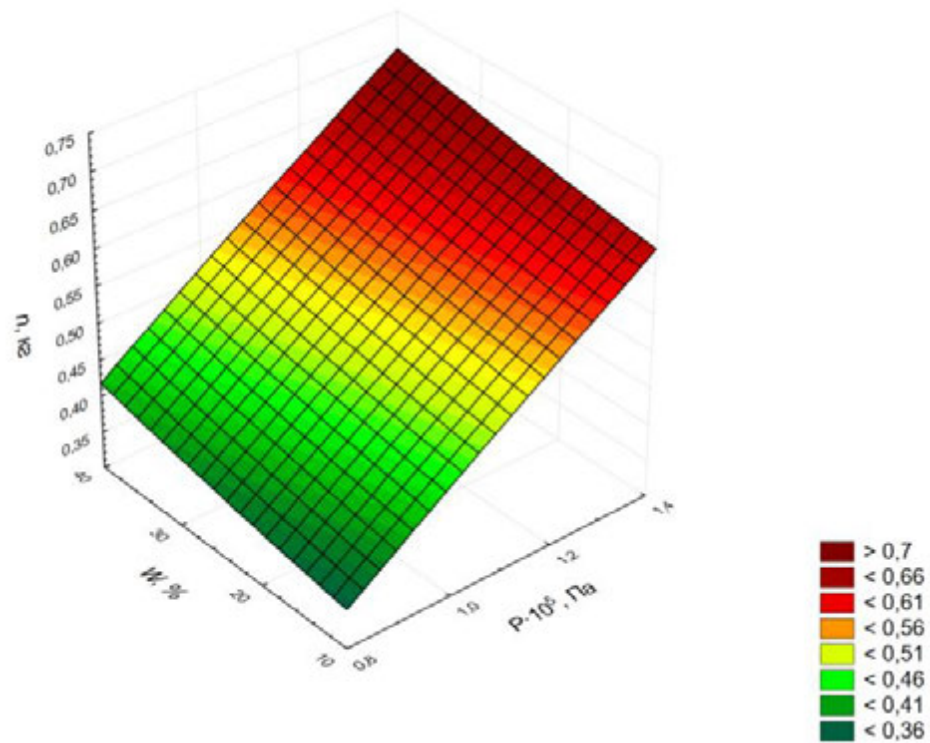


Рис. 3.23. Залежність кількості виробленого біовугілля в процесі піролізу при сталій температурі $T=500^{\circ}\text{C}$ та при змінних P та W .

Згідно з рис. 3.15–3.23 було встановлено, що із зростанням тиску в камері піролізу кількість виробленого біовугілля збільшується. Із зниженням тиску в системі кількість біовугілля зменшується при сталому зростанні тривалості процесу (рис. 3.3). Коли тиск в камері зростає спостерігається ріст температури, що призводить до зростання швидкості термохімічної реакції. Час перебування продуктів хімічних реакцій теж збільшується, що, в свою чергу, сприяє повній карбонізації біомаси. Сповільнення термохімічних реакцій має місце при інтенсивному відведенні теплоти продуктів хімічних реакцій, коли температура палива з біомаси знижується при зменшенні тиску в камері піролізу. Швидкість виробництва біовугілля тим нижча, наскільки вищим є вологовміст, що обґрунтовується витратами теплоти на нагрівання та фазове перетворення води (залишкової) під час термічного розкладання біомаси в камері піролізу. Кількість виробленого біовугілля від вихідної вологості біомаси практично не залежить. Із збільшенням температури кількість виробленого біовугілля також зростає.

Аналізуючи графіки 3.15–3.23 можна зробити висновок, що раціональними значеннями режимних параметрів камери піролізу є $W=40\%$, $P=1,4 \cdot 10^5$ Па та $T=500^\circ\text{C}$. При цьому кількість виробленого біовугілля складає 0,685 кг з 1 кг біомаси міскантусу, оскільки має найвищу з досліджуваних культур насипну щільність. Із зазначених трьох параметрів найбільший вплив на кількість виробленого біовугілля має тиск в камері газифікації, далі температура в камері. Вологість біомаси практично не чинить вплив на кількість виробленого біовугілля. Порівняно схожі результати було отримано науковцями в роботах [43–45].

3.4. Висновки до розділу 3

Експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичної моделі. Ступінь достовірності є високою, оскільки похибка не перевищує 10%.

1. Як результат аналітичного та експериментального дослідження встановлено:

- залежність тривалості процесу піролітичного розкладання аграрної біомаси та кількості виробленого біовугілля від вологості, розміру та щільності аграрної рослинної сировини, температури та тиску в камері піролізу, а також характер вказаних залежностей;

- вплив нагрівання та тиску в камері піролізу на коефіцієнти термохімічної усадки.

2. В результаті проведення багатофакторного експерименту встановлено, що раціональними значеннями режимних параметрів камери піролізу є $W=26\%$, $P=1,4 \cdot 10^5$ Па та $T=500^\circ\text{C}$. Кількість виробленого біовугілля складає 0,685 кг з 1 кг біомаси міскантусу (має найвищу з досліджуваних культур насипну щільність). Найбільший вплив на кількість виробленого біовугілля має тиск в камері газифікації, далі температура в камері. Початкова вологість біомаси має мінімальний вплив на кількість

виробленого біовугілля.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Представлено розрахунки економічної ефективності впровадження запропонованих заходів щодо підвищення ефективності процесу піролізу аграрної рослинної біомаси. За результатами досліджень, наведених в магістерській кваліфікаційній роботі, було удосконалено виробничий зразок піролізної установки, після чого продуктивність установки зросла на 24,8% і склала 75 кг біовугілля /год.

Щоб виконати техніко-економічне обґрунтування потрібно поррахувати витрати на виготовлення модернізованого зразка піролізної установки, а також, після введення технічних удосконалень, поррахувати очікувану річну економію за рахунок зниження, поррахувати базові економічні показники собівартості, річний економічний ефект та термін окупності додаткових вкладень.

Оскільки модернізація полягала у заміні піролізної камери установки піролізу аграрної рослинної біомаси, порівняння виконано для двох установок з новою та попередньою камерою піролізу, без урахування поточних витрат на створення усієї установки, використання заводських виробничих площ, їх підготовки тощо.

Врахувавши витрати коштів на сировину (пелети з міскантусу гігантеусу), заробітну платню, відрахування на амортизацію, поточний ремонт та технічне обслуговування та інші експлуатаційні витрати та задавшись річною програмою виробництва біовугілля в 150 тон/рік було порраховано: річний економічний ефект, який становить 38456 грн; коефіцієнт економічної ефективності, який дорівнює 0,487; термін окупності додаткових капітальних вкладень на модернізацію установки в розмірі 47800 років, який склав 2,05 років.

Результати економічних розрахунків наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результати розрахунків річного економічного ефекту від впровадження модернізації піролізної установки

№ п/п	Показник	Значення показників	
		базовий	пропонований
1	Вартість 1 кг пелет з міскантусу гігінтеусу, грн	19	19
2	Підвищення продуктивності установки за біовугіллям, %	-	24,8
3	Затрати коштів на сировину для виробництва 1 тони біовугілля	35128	28148
4	Затрати на заробітну плату та відрахування в розрахунку на 1 тону біовугілля	790,89	625,17
5	Відрахування на амортизацію (в розрахунку на 1 тону біовугілля) 15%, грн	540,21	598,49
6	Відрахування на поточний ремонт та технічне обслуговування (в розрахунку на 1 тону біовугілля) 8%, грн	288,11	339,59
7	Інші експлуатаційні витрати 10%, грн	360,14	406,99
8	Сумарні затрати (в розрахунку на 1 тону біовугілля), грн	37107,35	30018,24
9	Відносне зниження собівартості	-	18,34%
10	Додаткові капітальні вкладення, грн	-	47800
11	Річна програма виробництва біовугілля, тон/рік	150	150
12	Річний економічний ефект, грн	-	38456,0
13	Коефіцієнт економічної ефективності	-	0,487
14	Термін окупності додаткових капітальних	-	2,05

	вкладень, років		
--	-----------------	--	--

ВИСНОВКИ

1. Аналіз конструкцій установок для піролізу біомаси свідчить, що в більшості випадків, вони не відповідають сучасним вимогам щодо ефективності, енерговитрат і екологічності, тому потребують удосконалення. Відомі дослідження процесу піролізу біомаси, свідчать, що процес можна зробити контрольованим та високоефективним шляхом встановлення зав'язків між параметрами процесу (температура, тиск), властивостями біомаси (вологість) та кількістю виробленого біовугілля.

2. Розроблено математичну модель для розрахунку параметрів процесу піролізу рослинної біомаси (для виробництва біовугілля) на кожному з його етапів: нагрівання, сушіння, термічного розкладання та охолодження. Представлено відповідну блок-схему алгоритму для розв'язку зазначеної математичної моделі для розрахунку параметрів процесу піролізу біомаси.

3. Експериментальні дослідження підтвердили високу ступінь достовірності математичної моделі, оскільки похибка не перевищує 10%.

4. В результаті досліджень встановлено:

- залежність тривалості процесу піролітичного розкладання біомаси та кількості виробленого біовугілля від вологості, розміру та щільності сировини на основі аграрної рослинної біомаси, температури та тиску в камері піролізу, а також характер вказаних залежностей;

- вплив нагрівання та тиску в камері піролізу на коефіцієнти термохімічної усадки;

- раціональними значеннями режимних параметрів камери піролізу є $W=26\%$, $P=1,4 \cdot 10^5$ Па та $T=500^\circ\text{C}$. Кількість виробленого біовугілля складає 0,685 кг з 1 кг біомаси міскантусу (має найвищу з досліджуваних культур насипну щільність). Найбільший вплив на кількість виробленого біовугілля має тиск в камері газифікації, далі температура в камері. Початкова вологість біомаси має мінімальний вплив на кількість виробленого біовугілля.

5. Розрахунковий річний економічний ефект за умови модернізації піролізної установки відповідно становить 38456 грн при програмі виробництва біовугілля 150 т/рік, термін окупності додаткових капітальних

вкладень у розмірі 47800 грн становить 2,05 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Afessa, M. M., Debiagi, P., Ferreiro, A. I., Mendes, M.A.A., Faravelli, T., Ramayya, A.V. (2022). Experimental and modeling investigation on pyrolysis of agricultural biomass residues: Khat stem and coffee husk for bio-oil application. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 162, 105435. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105435>.
2. Afessa, M. M., Locaspi, A., Debiagi, P., Frassoldati, A., Caraccio, R., Ramayya, A. V., Faravelli, T. (2025). Pyrolysis of large biomass particles: Model validation and application to coffee husks valorization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 188, 107028. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107028>.
3. Anca-Couce, A., Scharler, R. (2017). Modelling heat of reaction in biomass pyrolysis with detailed reaction schemes. *Fuel*, 206, 572–579. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.011>.
4. Boichenko, S., Kuberskyi, I., Shkilniuk, I., Danilin, O., Kryuchkov, A., Rozen, V., Khotian, A., Sokolovska, N., Yakovlieva, A., & Pavlovskyi, M. (2024). Prospects of electricity generation through the use of alternative sources such as waste tires processing products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8 (131), 6–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313823>
5. Brunetkin, O., Maksymov, M. V., Maksymenko, A., & Maksymov, M. M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6 (100), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176422>
6. Cheenkachorn, Kr., Prapainainar, Ch., Wijakmatee, Th. (2025). Machine learning-driven modeling of biomass pyrolysis product distribution through thermal parameter sensitivity, *Renewable Energy*, 248, 123108. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123108>.
7. Chen, L., Chen, X., Zhao, Y., Xie, X., Yang, S., Hua, D., Wang, C.,

Li, T. (2023). Effect of the Torrefaction on the Physiochemical characteristics and Pyrolysis of the Corn Stalk. *Polymers*, 15(20):4069. <https://doi.org/10.3390/polym15204069>

8. Clemente-Castro, S., Palma, A., Ruiz-Montoya, M., Giráldez, I., Díaz, M.J. (2023). Comparative study of the combustion, pyrolysis and gasification processes of *Leucaena leucocephala*: Kinetics and gases obtained. *Heliyon*, 9 (7), e17943. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17943>.

9. Kieush, L., Boyko, M., Koveria, A., Khudyakov, A., & Ruban, A. (2019). Utilization of the prepyrolyzed technical hydrolysis lignin as a fuel for iron ore sintering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(6 (97)), 34–39. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154082>

10. Laouidi, Kh., Habchi, S., Fanezoune, C. K., Sallek, Br., Kussul, N., Bari, H. E. (2025). Advancements in artificial neural networks and fast pyrolysis of biomass processing: A comprehensive review and a bibliometric analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 189, 107098. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107098>.

11. Lee, T., Lee, S., Tsang, Y. F., Kwon, E. E. (2025). Carbon-negative power generation using syngas produced from CO₂-cofeeding pyrolysis of lignocellulosic biomass, *Energy*, 325, 136215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136215>.

12. Liu, Q., Wang, S., Zheng, Y., Luo, Z., Cen, K. (2008). Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG–FTIR analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82 (1), 170–177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.03.007>

13. Muxuan, L., Zhang, Y. Sh., Cheng, Sh., Qu, B., Li, A., Meng, F., Ji, G. (2023). The impact of heating rate on the decomposition kinetics and product distribution of algal waste pyrolysis with in-situ weight measurement. *Chemical Engineering Journal*, 457, 141368. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141368>.

14. Nagawkar, B. R., Subramaniam, Sh., Brown, R.C., Passalacqua, A. (2025). Computational models for the prediction of yields in the autothermal

pyrolysis of biomass. *Chemical Engineering Science*, 311, 121599. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121599>.

15. Nebyvaev, A., Klimov, D., Ryzhenkov, A., Brulé, M. (2023). Preliminary Results of Innovative Two-Stage Torrefaction Technology Applied for Thermochemical Treatment of Sunflower Husk. *Processer*, 11(8):2486. <https://doi.org/10.3390/pr11082486>.

16. Nunes, L. J. R. (2020). A Case Study about Biomass Torrefaction on an Industrial Scale: Solutions to Problems Related to Self-Heating, Difficulties in Pelletizing, and Excessive Wear of Production Equipment. *Appl. Sci.*, 10 (7):2546. <https://doi.org/10.3390/app10072546>

17. Pascarella, A. E., Coppola, A., Marrone, S., Chirone, R., Sansone, C., Salatino, P. (2025). Critical assessment of machine learning prediction of biomass pyrolysis, *Fuel*, 394, 135000. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135000>.

18. Ren, Y., Wang, T., He, J., Hu, H., Liu, H., Li, X., Yao, H. (2025). Investigation of the electrochemical characteristics of gaseous products derived from low-temperature molten nitrate salt pyrolysis of biomass. *Fuel*, 395, 135213. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135213>.

19. Ribeiro, J. M. C., Godina, R., Matias, J. C. O., Nunes, L. J. R. (2018). Future Perspectives of Biomass Torrefaction. *Sustainability*, 10(7):2323. <https://doi.org/10.3390/su10072323>.

20. Ключ В.П., Ключ С.В. Патент України на корисну модель № 143271. Реактор піролізний. К.: ДП «Український інститут інтелектуальної власності», 2020.

21. Shi, H., Huang, Y., Qiu, Y., Zhang, J., Li, Zh., Song, H., Tang, T., Xiao, Y., Liu, H. (2025). Modelling of biomass gasification for fluidized bed in Aspen Plus: Using machine learning for fast pyrolysis prediction. *Energy Conversion and Management*, 332, 119695. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119695>.

22. Tiwari, M., Vinu, R. (2025). In situ and ex situ catalytic microwave pyrolysis of biomass pellets using Ni/Al₂O₃ for hydrogen and bio-oil production.

Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 189, 107044.

<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107044>.

23. Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N.R., Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9:728140. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>.

24. Xia, H., Xu, L., Sun, Y., Xie, Ch., Zuo, Ch., Zhang, D., Yao, G., Liu, M., Wang, F., Lu, J. (2025). Clean microwave carbothermic reduction of hematite using biomass-derived products: Dual role of biochar and pyrolysis gas. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 189, 107063. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107063>.

25. Zhao, Ch., Xia, Q., Wang, S., Lu, X., Yue, W., Chen, A., Chen, J. (2025). A study on machine learning prediction of bio-oil yield from biomass and plastic Co-pyrolysis. *Journal of the Energy Institute*, 120, 102069. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102069>.

26. Zheng, Y., Tao, L., Xiaoqin, Y. (2017). Effect of the Torrefaction Temperature on the Structural Properties and Pyrolysis Behavior of Biomass. *BioResources*, 12(2), 3425–3447. DOI:10.15376/biores.12.2.3425-3447

27. Ключ В.П., Ключ С.В., Маслова Н.О. (2021). Застосування окиснювального піролізу для переробки органічних відходів. *Відновлювана енергетика*, 2, 93–99. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).93-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).93-99)

28. Ключ С. В. (2013). Визначення частки соломи та рослинних відходів для енергетичного використання. *Відновлювана енергетика*, 4, 82–85.

29. Didura V., Struchaev M., (2008), Heat engineering (Теплотехніка), “Agrarian education”, ISBN 966-7906-43-4, 233 p., Kyiv/Ukraine;

30. Heidenreich, S., Müller, M., Foscolo, P. U. (2016). Advanced Biomass Gasification. New Concepts for Efficiency Sincrease and Product Flexibility. Chennai : MPS Limited, 137. doi: 10.1016/B978-0-12-804296-0.00001-

31. Reed, T. B., Das, A. (1988). Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. Golden : Solar Energy Research Institute, 148.
32. Basu, P. (2018). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory (3rd ed.). San Diego: Elsevier Science Publishing Co Inc.
33. Slade, R., Saunders, R., Gross, R., Bauen A. (2011). Energy from biomass: the size of the global resource. An assessment of the evidence that biomass can make a major contribution to future global energy supply. Imperial College Centre for Energy Policy and Technology, UK Energy Research Centre, London, 120.
34. Jenkins, R.G. (2020). Thermal gasification of biomass – a primer. In Bioenergy (2nd ed.): Biomass to biofuels and waste to energy (pp. 293-324). New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00015-4>
35. Lewandowski, W.M., Rym, M., Kosakowski, W. (2020). Thermal Biomass Conversion: A Review. Processes, 8 (5), 516. <https://doi.org/10.3390/pr8050516>
36. Ge, L., Zhao, C., Wang, Z., Zuo, M., Yao, L., Wu, K., Wang, Y., Xu, Ch. (2025). A new method for the preparation of biomass-based solid fuels: Pyrolysis-impregnation-cobaking. Energy, 321, 135522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135522>.
37. Голуб Г. А., Цивенкова Н.М., Марус О. А., Павленко М. Ю., Яременко О. А.; за ред. Г. А. Голуба. Машини та обладнання для біоенергетики: навч. посіб. К.: НУБіП України, 2022. 203 с. 12,8 др. арк.
38. Грищук, Ю. С. (2008). Основи наукових досліджень : навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2008. 232.
39. Важинський, С. Е., Щербак, Т. І. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 260 с.
40. Бобилев, В. П., Іванов, І. І., Пройдак, Ю. С. Методологія та організація наукових досліджень : підручник. Нац. металург. акад. України.

Дніпропетровськ : ІМА-прес, 2014. 643 с.

41. Fundamentals of scientific research and theory of experiment: Study guide for Master's degree students majoring in 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics" / compiled by YB Kapatsila, PO Marushchak, VB. Savkiv, O. P. Shovkun. Ternopil: Palianytsia V.A., 2023. 186

42. Підручник дослідника: навч. посіб. для студ. агротех. спец. / О. Васильковський, С. Лещенко, К. Васильковська, Д. Петренко. Кіровоград, 2016. 204 с.

43. Wei, T., Hong, H., Zhang, H. et al. Comparative Carbonization Study of Pyrolyzed Biomass: New Insights Into the Structure and Composition Evolution of Biochar. *Bioenerg. Res.* 18, 13 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10819-x>

44. Wu, Sh., Wang, Q., Fang, M., Wu, D., Cui, D., Pan, Sh., Bai, J., Xu, F., Wang, Zh. (2023). Hydrothermal carbonization of food waste for sustainable biofuel production: Advancements, challenges, and future prospects. *Science of The Total Environment*, 897, 165327. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165327>.

45. Mishra, R. K., Mohanty, K. (2023). A review of the next-generation biochar production from waste biomass for material applications. *Science of The Total Environment*, 904, 167171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167171>.