

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**Обґрунтування методу отримання калорійного паливного газу з відходів
переробних підприємств**

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

_____ Давидов Денис Дмитрович

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Рецензент: _____

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: "Магістр"

208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

тракторів і СГМ

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„ _____ ” _____ 20__ р.

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

Давидов Денис Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи :** Обґрунтування методу отримання калорійного паливного газу з відходів переробних підприємств

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

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“12” 11 2024 року №3784

2. **Строк подання студентом роботи** 29.11.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Аналіз технологій отримання калорійного паливного газу з відходів переробних підприємств, огляд джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Особливості виробництва біопалива. Визначення актуальності дипломної роботи 2. Обґрунтування схеми отримання біопалива . 3. Методика моделювання ефективності використання паливного газу. 4. Дослідження ефективності використання паливного газу. Планування експеримента 5. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 6. Економічна ефективність використання газу. Висновок. Бібліографічний список.

5 Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 26.02.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

_____ (підпис)

Давидов Д.Д
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотовська О.В.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА.	9
ВИЗНАЧЕННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	
1.1 Паливний баланс України	9
1.2 Енергетичний аналіз застосування біопалива	14
1.3 Аналіз методів переробки біомаси	17
1.3.1 Обґрунтування газифікації біомаси	17
1.3.2 Обґрунтування анаеробного зброджування	21
1.3.3 Обґрунтування спалювання відходів біомаси	23
1.3.4. Обґрунтування способу піролізу	26
2 ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМИ ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА	33
2.1 Дослідження вологості рослинної речовини	35
2.2 Експериментальні дослідження якості піролізного газу	36
2.2.1 Визначення складу газу	37
3 МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	44
ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗА	
3.1 Рівняння теплового балансу установки	44
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ	50
ПАЛИВНОГО ГАЗУ. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТА	
4.1 Визначення теплоти згоряння палива калориметричним методом	50
4.1.1 Планування дослідю	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО	55
СЕРЕДОВИЩА	
4.1 Організація охорони праці на підприємствах	55
4.2. Вимоги безпеки праці під час виконання робіт на опалювальних	56
газових установках	
4.2.1. Загальні положення	56
4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком робіт	57
4.2.3 Вимоги безпеки праці під час виконання робіт	57
4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях	58
4.2.5 Вимоги безпеки праці після завершення робіт	59
5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГАЗУ	61
ВИСНОВКИ	65
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	67

АНОТАЦІЯ

Давидов Д.Д. Обґрунтування методу отримання калорійного паливного газу з відходів переробних підприємств/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

В роботі ми проаналізували конструкцію установок для переробки рослинної сировини в паливний газ. На основі порівняльного аналізу були визначені пропозиції щодо існуючих конструкцій та майбутнього використання. Беручи до уваги взаємозв'язок між геометричними і енергетичними параметрами установки, проводяться аналітичні дослідження закономірності отримання багатокалорійних газів в установці. Визначено характер впливу технічних параметрів процесу піролізу біомаси і теплопровідності на паливні властивості одержуваного газу. Розроблено математичну модель всього процесу газифікації продуктів піролізу деревини. Розробляються схеми теплової обробки біомаси з утворенням паливних газів і їх збагачення. Проведена економічна оцінка установки.

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

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

Вступ

Одним з ключових питань для ефективної реалізації енергетичної політики в Україні є створення енергетичного та паливного балансу відповідно до енергетичних запасів країни та світових тенденцій використання енергоресурсів. Згідно з Загальнодержавною комплексною програмою енергозбереження України, енергетичні ресурси з відновлюваних джерел становлять 7,82 млн. тонн на рік, з яких 27% - біоенергія. Біомаса може бути найкращим відновлюваним джерелом енергії для України, яка має розвинений сільськогосподарський сектор та велику кількість органічних відходів.

Одним із сучасних напрямків використання енергії біомаси є виробництво газоподібного палива шляхом піролізу.¹

Вивчення різних технологій переробки біомаси, представлених в науковій літературі, дозволяє зробити висновок, що багато з них є недостатньо ефективними через деякі недоліки, які не враховуються при піролізі органічної сировини, такі як їх робота по відношенню до процесу теплообміну в піролізній камері, покращення їх технічних характеристик тощо.

Метою даної роботи є отримання висококалорійного паливного газу з відходів на установках з урахуванням його ефективності (теплотворної здатності, екологічності) та доступної сировини.

Предмет дослідження – закономірності отримання багатокалорійного газу

Об'єкт дослідження – піролізна камера

Завдання роботи. Для досягнення поставлених цілей в роботі були вирішені наступні задачі:

- проаналізувати паливно-енергетичний баланс з метою зменшення дефіциту традиційних та власних паливно-енергетичних ресурсів,
- проаналізувати технології отримання паливного газу з різних видів рослинних решток та виявити прогалини,
- провести дослідження з виробництва піролізного газу,

- провести експерименти з удосконалення експериментального обладнання для підвищення теплогенеруючого ефекту газоподібних палив,
- створити методологію моделювання ефективності виробництва газу з метою обґрунтування прийнятих рішень щодо вдосконалення пілотної установки,
- визначити співвідношення витрат і вигод від впровадження установки з виробництва паливного газу.

1 ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА. ВИЗНАЧЕННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

1.1. Паливний баланс України.

Одним з ключових питань для ефективної реалізації енергетичної політики в Україні є формування паливно-енергетичного балансу відповідно до світових тенденцій використання власних енергетичних ресурсів та енергоносіїв. Згідно з Єдиною державною програмою енергозбереження України, енергетичні ресурси з відновлюваних джерел енергії становлять 7,82 млрд. тонн на рік, з яких 27% - біоенергія. Для України, яка має розвинений аграрний сектор і виробляє значну кількість органічних відходів, біомаса може бути найкращим джерелом відновлюваної енергії.

В той же час, споживання основних джерел енергії зросло з 2002 року, що, очевидно, пов'язано зі збільшенням виробничих потужностей промислових підприємств [1]. Зростання вартості всіх видів палива, рішення міжнародних організацій та урядів щодо захисту навколишнього середовища змушують виробників електростанцій, винахідників та дослідників розробляти та впроваджувати технічні рішення для підвищення ефективності спалювання та зменшення викидів.

Зростання цін на енергоносії сприяє зменшенню їх споживання. Енергетична криза в Україні зумовлена дефіцитом власних паливно-енергетичних ресурсів, який доводиться покривати за рахунок імпорту вугілля, нафти і газу, а також неефективним використанням цих ресурсів у країні-споживачі. Падіння ВВП перевищує падіння попиту на енергію, що призводить до погіршення показників енергоефективності. Відповідно до представлених на рисунку 1 прогнозів виробництва, прогнози виробництва є наступними: 1.1 Величина ВВП (валового внутрішнього продукту) за основними показниками збільшиться в 3,1 рази, з 52,3 млрд грн у 2017 році до 128,62 млрд грн у 2030 році [1-5].

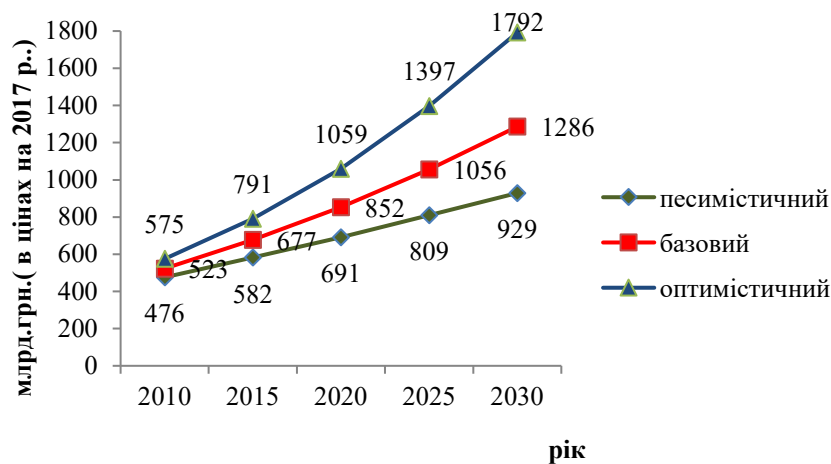


Рис. 1.1. Прогноз об'ємів виробництва ВВП, млрд. грн.

Це означає, що прогнозується середньорічне зростання ВВП упродовж цих років на 4,9% рік. З цієї енергетичної стратегії видно, що це досить оптимістичний показник, який у свою чергу може привести до завищеного прогнозу споживання ПЕР (паливно-енергетичних ресурсів) в 2030 році (у 4,3 р.). Проте, при реалізації і підготовці Енергетичної стратегії на період 2030 були порушені базові принципи системності розробки, принцип комплексності розгляду проблем, принцип узгодженості структурних складових. З другого півріччя 2013 р. розпочався спад ВВП. У жовтні уперше за увесь період після серпня 2013 р. було зафіксовано падіння ВВП на 2,1%, а в листопаді - вже на 14% по відношенню до жовтня. Промислове виробництво тільки за один місяць - в жовтні 2013 р. знизилося на 19,8%, в т.ч.: в добувних галузях - на 32,1%.[17]. Міжнародний валютний фонд (МВФ) у кінці 2013 року погіршив прогноз ВВП України із зростання на 2,5% до зниження на 5% в 2014 році.

Як ми бачимо, навіть песимістичний сценарій динаміки ВВП, наведений в аналізованому стратегічному документі [17-20], не відповідає реальності розвитку української економіки на поточному етапі. Це вказує на помилку у визначенні енергоспоживання на галузевому і секторальному рівнях, а отже, і у визначенні їх поставок.Тобто, по суті, енергетична стратегія заснована на низькій достовірності показників балансу енергопостачання та

енергоспоживання в Україні до 2030 року. Таким чином, одним з основних напрямків реалізації енергетичної політики країни є формування паливно-енергетичного балансу (ТЕБ), який відповідає власним запасам України в регіоні та загальносвітовій тенденції використання енергоносіїв. Друга проблема – застарілі технології та обладнання, на яких базується українська промисловість. На жаль, в Україні немає адекватного ставлення до цього питання. На зниження рівня енергозалежності в основному впливають заходи щодо скорочення частки в загальному обсязі імпорту поліетилену і поліпшення його використання. Тому необхідно ретельно обміркувати стан світового енергетичного ринку, всього світового енергетичного сектора, перспективи його розвитку і роль України на глобальному світовому ринку.

У таблиці 1.1 приведені прогнози оцінки Інституту загальної енергетики НАН України [15] на структуру світового споживання первинних ПЕР на перспективу до 2020 року і до 2030 року. Аналіз показує, що в цілому у світі спостерігається тенденція пріоритетного зростання попиту на газ (до 4-5% щороку), темпи зростання споживання нафти і вугілля будуть в два рази меншими.

Таблиця 1.1

Структура світового споживання паливно-енергетичних ресурсів

Енергоносії	Споживання первинних ПЕР, млрд.т у.п.								Структура споживання, %			
	1990 г.	2000 г.	2020 г.прогноз			2030 г.прогноз			1990 г.	2000 г.	2020 г. Вероят.	2030 г. вероят.
			min	max	вероят.	Min	max	вероят.				
Всього в т.ч.:	11,2	13	16	23	19	17,9	26	21	100	100	100	100
Тверде паливо	3,25	3,7	4,8	6,9	5,7	5,13	7,4	6,1	29	28,5	30	29
Нафта	4,4	5,0	6,1	7,8	6,6	6,45	8,9	7,3	39	38,5	34,6	34,8
Газ	2,5	2,9	3,9	5,7	4,6	4,2	6,7	5,2	22	22,3	24,1	24,8
Атомна енергія	0,8	0,9	1,0	1,7	1,3	1,06	1,9	1,3	7,0	6,9	7,1	6,2

Гідроенергія	0,3	0,3	0,5	0,55	0,5	0,58	0,6	0,6	2,7	2,7	2,6	2,9
НВДЕ	0,05	0,1	0,2	0,35	0,3	0,48	0,5	0,5	0,4	1,1	1,6	2,3

Українська вугільна промисловість займає перше місце серед інших галузей за обсягами виробництва твердого палива. З таблиці видно, що рівень цін на енергетичне вугілля, за прогнозами, буде відносно стабільним, а очікувані темпи зростання до 2030 року чималі - 15-20%. Така цінова стабільність пояснюється наявністю значних світових запасів вугілля (67% від загального обсягу) і зростаючим міжнародним ринком, на якому в даний час продається близько 700 млн тонн вугілля на рік, і цей показник щорічно збільшується на 4-6%. Ціни на нафту і природний газ значно зростуть. Це пов'язано зі стрімким виснаженням світових запасів нафти і постійним зростанням витрат на її видобуток і транспортування. Таким чином, в Україні споживання природного газу в 1,7 рази перевищує споживання вугілля, а його частка в світовому паливно-енергетичному балансі (ТЕБ) майже в 2 рази. Структура ТЕБ України економічно недоцільна. Скоротити абсолютну кількість і частку споживання природного газу з одночасним зміщенням акценту в бік використання відновлюваних джерел енергії, в бік використання вугілля в якості основного енергетичного ресурсу. Для України, яка в силу географічного положення має помірний потенціал вітро-, гідро- і сонячних ресурсів, і, в той же час, має розвинене сільське господарство, що виробляє значну кількість органічних відходів, біомаса може і повинна стати пріоритетним розвитком поновлюваних джерел енергії.

В таблиці 1.2 наведені плановані напрями освоєння енергетичного використання біомаси.

Напрямок освоєння ОДЕ в 2010-2030 рр. в Україні
(проект "Енергетичної стратегії України в 2030 г".)

Напрямок ОДЕ	Одиниці вимірювання	Заміщення традиційних палив по рокам			
		2010	2015	2020	2030
Енергетичне використання БМ, в т.ч.	тис. т у.п.	988	2662	6318	9215
Виробництво електроенергії	МВт тис. т у.п.	124 286	151 324	772 1618	1158 2440
Виробництво теплової енергії	МВт тис. т у.п.	91 702	1301 702	4455 2360	6520 3460
Кінцеве споживання БМ як котельного пічного палива	тис. т у.п.	923	1375	1430	1495

В результаті велика частина потенціалу біомаси буде витрачена на виробництво теплової енергії: в 2015 році - 702 тисячі тонн кубометра, а в 2030 році - 346 мільйонів тонн кубометра. Загалом енергетичний потенціал українських біоенергетичних ресурсів (відходи сільського та лісового господарства, торф) еквівалентний 21 мільярду кубометрів природного газу. Саме стільки газу видобувається в країні на сьогоднішній день. Таким чином, до 2030 року біомаса зможе забезпечити близько 10% від загального попиту на первинну енергію в Україні (сьогодні її кількість у вигляді традиційного палива становить 2 мільярди 2000 мільйонів тонн). Розвиток цієї складової балансу дозволить в майбутньому перерозподілити співвідношення споживання різних видів енергії, а саме нетрадиційної енергетики. Збільшення частки енергоносіїв, особливо біопалива, буде супроводжуватися значним скороченням споживання твердого палива, газу і нафти. Така перспектива може виявитися реальною навіть для основного виробництва. Наприклад, у літературі з'являються публікації про використання піролізного газу як добавки до природного газу, що використовується в промисловості [30-34]. Очевидно, що заміна традиційних видів палива біологічними представляє певний інтерес як з економічної, так і з технічної точки зору. Тому метою даної статті є розробка технічних аспектів

виробництва біопалива з урахуванням його ефективності (теплотворної здатності, екологічності) і сировинної бази.

1.2. Енергетичний аналіз застосування біопалива

Біомасу можна використовувати як тверде паливо або переробляти в рідкий або газоподібний стан. В якості твердого палива можна використовувати кускові відходи деревообробки. Однак вивозити сипучі відходи (великогабаритні) за межі підприємства не вигідно навіть на невеликі відстані, оскільки операції зі зберігання і навантаження-розвантаження дуже складні. Тому рекомендується переробляти масові відходи в тріску на місці і відправляти цю тріску у відповідну спеціалізовану промисловість для використання в якості сировини. Технологія при використанні не тільки в якості сировини, але і в якості палива для заводів, крупнокускові відходи слід переробляти в тріску (при використанні звичайних котлів). Відходи розміром від -25 до 100 мм (стружка) будуть горіти найбільш ефективно і інтенсивно [37]. Залежно від передбачуваного призначення і вимог розрізняють технічну стружку і паливну тріску. Основним обладнанням при виробництві технічної стружки є подрібнювальна машина. Брикети з розсипчастої деревини виготовляються методом пресування зі сполучною речовиною або без нього. Більш широке застосування отримало брикетування без сполучної речовини. Об'ємна деревина, яка займає значне місце, після брикетування зменшується в об'ємі в кілька разів, що робить її транспортабельною і простою в обігу. Брикетування сипучих відходів підвищує теплотворну здатність тирси і тріски. Брикети використовуються в якості палива на заводах і для постачання твердим паливом місцевих жителів. Брикетування деревної тирси підвищує продуктивність травної системи в гідролізному виробництві при завантаженні в ці котли брикетів з деревної тирси замість деревної тирси. Для брикетування тріски потрібно більш потужний прес, ніж для брикетування деревної тирси. Насправді брикетів піддаються тільки тирса. Вологість тирси перед брикетуванням повинна становити не більше 12-15% і не більше 8-9% відповідно [38]. Гранулювання деревних відходів полягає в

отриманні паливних гранул з деревних відходів, що утворюються при механічній обробці деревини. До переваг такого способу переробки можна віднести раціональне використання деревних відходів, отримання висококалорійного екологічно чистого палива, підвищену економічність, можливість впровадження системи механізації та автоматизації паливної апаратури за рахунок використання пелет, а також підвищену стабільність процесу горіння. Gorenje. Технологія гранулювання деревних відходів Gorenje включає в себе збір відходів, дроблення, сушку і пряме гранулювання. Суть гранулювання полягає в послідовній обробці сухого, дрібнодисперсного сипучого сировини під впливом вологості, температури і тиску. СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИЙ гранулятор може бути використаний в якості основного обладнання для гранулювання.

У нетрадиційній енергетиці особливе місце займає утилізація біомаси шляхом метанової ферментації з отриманням біогазу, що містить близько 70% метану, і знезаражених органічних добрив. Використання біомаси в сільському господарстві дуже важливо, витрачається велика кількість палива через різних технологічних потреб і потреби у високоякісних добривах постійно зростає. Біогаз-це суміш метану і вуглекислого газу, що утворюється в процесі анаеробного зброджування в спеціальних реакторах-метантенках, які влаштовані і контролюються таким чином, щоб забезпечити максимальне виділення метану. Енергія, отримана при спалюванні біогазу, може досягати 60-90% енергії сировини [39-43]. Ще однією і дуже важливою перевагою процесу переробки біомаси є те, що її відходи містять значно менше патогенів, ніж сировина. Виробництво біогазу економічно виправдано і вигідно при переробці постійного потоку відходів (стічних вод тваринницьких ферм, боєнь, рослинних відходів і т.д.). Економічна ефективність полягає в тому, що немає необхідності в попередньому збиранні відходів, організації та управлінні подачею; в той же час з часом стає відомо, коли і в якій кількості будуть отримані відходи. Виробництво біогазу можливе на обладнанні різних розмірів, особливо ефективному в агропромислових комплексах з можливістю повного екологічного циклу. Рідкі види палива, одержувані з біомаси, включають піроліз, а не біопаливо (біоетанол, біодизель) або смоли, пальне і масла. Паливний

етанол-це високооктановий кисневмісний компонент палива, що отримується шляхом ферментації цукру. Цукор зазвичай видобувається з цукрових зерен шляхом гідролізу крохмалю в зернах або шляхом гідролізу лігноцелюлозних матеріалів, таких як солома, трава та деревина. Основні процеси включають ферментативний гідроліз крохмалю і цукрів, що містяться в злаках, і ферментацію цукрів в етанол з використанням дріжджів. Він підходить для перегонки слабкого розчину етанолу, зневоднення його з отриманням безводного етанолу і змішування з автомобільним бензином. Біодизельне паливо-це вид палива, що отримується шляхом етеріфікації рослинних олій, яке можна змішувати або використовувати як альтернативу дизельному паливу в двигуні.1. Одним з основних видів сировини для виробництва біодизельного палива є Ріпак, який містить багато жиру, що забезпечує високу теплоту згоряння. Згідно з прогнозами виробництва [44], ріпакова олія посідає четверте місце у світі (29,7%) після соєвої (13,1%), пальмової (12,3%) та соняшникової (9,7%) олій. Існує кілька способів використання насіння ріпаку для виробництва палива. [44-48]:

1. Отримання олії, фільтрація і добавка його в дизельне паливо в об'ємі 20-50%.
2. Отримання олії, фільтрація і робота на чистій рапсовій олії. Таку технологію уперше запропонував Рудольф Дизель в 1895 р.
3. Отримання рапсово-метилового ефіру - продукт переробки рапсової олії.
4. Переробка рапсової олії на нафтоперегінних заводах і отримання біодизельного палива.

З наведених вище даних випливає, що використання відходів сільськогосподарських підприємств, наприклад, деревообробних, в якості сировини для виробництва палива має велику економічну привабливість. ВИРОЩУВАННЯ сировинних технічних культур вимагає: великих земельних ділянок; додаткового обладнання для переробки в рідке паливо, високих енерговитрат на його виробництво, відповідних енергетичному потенціалу одержуваного продукту [44-48].

Тому в роботі основна увага приділяється розробці технології виробництва висококалорійного палива з відходів переробних підприємств.

1.3. Аналіз методів переробки біомаси

1.3.1. Обґрунтування газифікації біомаси

Термохімічна газифікація-це процес часткового окислення вуглецевих матеріалів, таких як біомаса, торф і вугілля, з отриманням газоподібних енергоносіїв. Газ, що утворюється, складається з монооксиду вуглецю, водню, метану, двоокису вуглецю, невеликої кількості вуглеводневих сполук високого порядку, таких як метан і Етан, включаючи водяну пару, азот (продувається повітря), різні домішки смол, частинки вуглецевмісного матеріалу, золу. В якості окислювачів при газифікації можна використовувати повітря, кисень, водяна пара або суміші цих речовин. Максимальна температура становить 800-1300 °С.

Низькокалорійний газ-це природний газ, одержуваний шляхом газифікації повітря, з більш високою теплотою згорання 4,6 МДж/м³. Цей газ після очищення можна спалювати в котлі за допомогою газового двигуна або турбіни, але через низьку щільність енергії він не підходить для транспортування трубопроводом.

Низькокалорійний газ-це газ, що отримується при газифікації з використанням кисню (10-12 МДж/м³). Він підходить для використання в якості обмеженого трубопровідного транспорту і в якості об'єднуючого газу для виробництва метанолу і бензину.

За допомогою парової газифікації можна отримати газ середньої калорійності з теплотворною здатністю 5,12 МДж/м³, який являє собою двоетапний процес, здійснюваний в 2 реакторах з псевдозрідженим шаром.

В даний час найбільш широко використовується газифікація повітря. Це усуває всі витрати і труднощі, пов'язані з виробництвом і використанням кисню, а також необхідність в 2 парових реакторах. [5].

Залежно від типу шару сировини і способу подачі окислювача розподіляються основні технології газифікації. Щільний шар з низхідним газообміном (NRG); щільний шар з висхідним газообміном (VRG); щільний шар з бічним газообміном; псевдозріджений шар (KSH); циркулюючий шар; проточний; 2 реактора з псевдозрідженим шаром.

Газифікація за допомогою NRG проста і надійна для відносно сухих деревних чурок і тріски з вмістом вологи до 30% (по масі) і золи менше 3-5% (по масі), а обмеження, пов'язані з розміром частинок, призводять до наявності верхньої межі продуктивності газифікатора (приблизно 500 кг/год або 500 кв.м). Вміст смоли в цьому газі становить 50-500 мг/м³ [72-78].

Під час газифікації за допомогою VRG значна частина тепла утворюється газу витрачається на теплообмін з сировиною, яке висушується, нагрівається і піддається піролізу перед надходженням в зону газифікації. Крім того, газифікатор з VRG може стабільно працювати з сировиною вологістю до 55%. Вимоги до фракційного складу сировини не більш жорсткі, ніж у газифікатора з NRG. Але недоліком є високий вміст смоли в одержуваному газі (близько 20% всіх продуктів піролізу). Тому для використання в якості палива цей газ вимагає значної очистки або повинен використовуватися в безпосередній близькості від газогенератора.

Пристрій для газифікації з бічним переміщенням газу під час роботи багато в чому аналогічно пристрою для газифікації з NRG. Газифікатор такої конструкції широко не використовується.

Газифікація в KSH характеризується високою швидкістю тепло-і масообміну, хорошим перемішуванням твердої фази, що забезпечує високу швидкість реакції і постійну температуру шару. Частинки сировини повинні бути відносно невеликими за розміром в порівнянні з частинками в щільному шарі, тобто потрібне додаткове подрібнення. Зола вловлюється і видаляється з вихідного газу Системи очищення. Робоча температура для газифікації біомаси становить 800-850 °C. У більшості випадків ступінь перетворення вуглецю досягає 100% або навіть відбувається надмірне видалення дрібних частинок. Газифікатор KSH виробляє газ із вмістом смоли 5-10 г / м³[81], розташованим

між рівнями вмісту смоли в газі, отриманому з vrg та NRG. Температура газифікації становить 1200-1500°C. в результаті генераторний газ має низьку концентрацію смоли. Але існує велика проблема з вибором матеріалу і плавленням золи. Крім того, в подібних установах мало досвіду роботи з біомасою.

Газифікація в двох реакторах з псевдозрідженим шаром використовується для отримання газів з більш високою теплотворною здатністю, ніж в одному газифікаторі KSH з продувкою повітрям. Однак, з точки зору вмісту смоли, якість газу є недостатнім.

Якість і склад продуктів газифікації для різних типів реакторів і використовуваних окислювачів наведені в таблиці 1.6. [53,72-78].

У таблиці 1.7 показаний типовий склад енергетичного газу, одержуваного при газифікації різних БМ [72-74, 79].

Порівняння економічних показників установок невеликої потужності різного типу, призначених для вироблення тепла, а також установки з виробленням тепла і електроенергії наведені в таблиці 1.8 [50-54].

Таблиця 1.6

Характеристики генераторного газу

Реактор, окислитель	Продуктивність, т/год	Потужність МВт *	Q _n , МДж/м ³	Якість газу ***	Температура газу на виході з реактора, °С
НРГ, воздух	0,1-0,7	0,2-1,4	4-6	4	700-1000
НРГ, кисень	1-5	2-10	9-11	4	700-1100
ВРГ, повітря	0,5-10	1-20	4-6	3	100-400
ВРГ, кисень	1-10	2-10	8-14	3	100-700
КШ повітря	0,5-15	1-30	4-6	3	500-900
КШ, кисень	2-10	4-20	8-14	3	700-1100
КШ, пар	1-10	2-20	12-18	3	700-900
Два реактора КШ	1-10	2-20	13-20	3	750-1000

* - переробка сировини загальним ККД=36%;

*** 1,5- найбільший та найменший зміст золи та частинок в не фільтрованому газі

Таблиця 1.7

Склад генераторного газу, % (об.)

Сировина	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂
Деревинна щепка	29	18,8	3	10,3
Лісові відходи	20	14	2.5	10
Порубана солома	18,9	17,6	2,3	13,8

Таблиця 1.8

Показники установок

Показники	З прямим спалюванням	Газифікаційна установка	
		Bioneer	Biocycle
Потужність електрична, МВт	0	0	7,2
Потужність тепла, МВт	1,6	6	6,78
Капітальні витрати, кВт _т	-	-	4726
Капітальні витрати, кВт _{ел}	295	350	5018
Експлуатаційні витрати на тех. обслуговування	0,014	0,816	1,3
Вид сировини	Деревини	Деревина, торф	Деревина

Однак, незважаючи на дослідницькі та конструкторські роботи, що проводяться в багатьох країнах у цій галузі, процес газифікації біомаси ще не набув широкого комерційного поширення.

1.3.2. Обґрунтування анаеробного зброджування

Анаеробне зброджування відноситься до біологічного методу переробки біомаси. В процесі анаеробного зброджування або розкладання (шляхом ферментації) органічні речовини розпадаються на CO_2 і CH_4 . Процес анаеробної переробки органічних відходів відбувається за відсутності кисню за участю різних груп бактерій (ацетобутанова ферментація), в результаті чого під дією мікробного вуглецю і водню утворюються оцтова, Масляна кислоти, етанол, бутанол, ізопропанол і діоксид. Однак зустрічаються технічні процеси, що вимагають використання концентрованих кислот для прискорення гідролізу. У зв'язку з цим необхідно використовувати додаткові спеціальні Конструкційні матеріали. Крім того, вартість отримання продуктів ферментації на сьогоднішній день все ще дуже висока, а розроблені на їх основі процеси малопродуктивні.

Ферментація відходів-це процес розкладання органічної речовини з утворенням метану і вуглекислого газу в результаті життєдіяльності складного комплексу мікроорганізмів в анаеробних умовах. На першому етапі процесу високомолекулярні сполуки (вуглеводи, жири, білкові речовини) розщеплюються на дрібномолекулярні органічні сполуки. На другому етапі відбувається остаточне бактеріальне перетворення в органічні кислоти і їх солі, а також спиртовмісні органічні речовини діоксиду вуглецю (CO_2), водню (H_2), сірководню (H_2S) і аміаку (NH_3), при якому кислотоутворюючі бактерії беруть участь в розкладанні 2 основних компонентів (вуглецю діоксид і метан), проводиться на 3-му етапі.

Основний вплив на цей процес, який відбувається в спеціальних біологічних реакторах (метантеках), надають такі умови: перше - недолік кисню, оскільки метанообразуючим бактеріям для життєдіяльності потрібно абсолютно анаеробне середовище. Друга умова-підтримка постійної температури. Біологічні процеси найкращим чином протікають в діапазоні температур 30-37°C. хороші результати також виходять при проведенні так званого термофільного процесу, який проводиться при температурі 55-60°C. [59].

Третя умова-підтримка заданого значення рН в діапазоні 6,5-8,5. Четверте-підтримка певного співвідношення газів в сировині. Наприклад, оптимальне співвідношення вуглецю та азоту (C/N) має бути в межах 16/19. На додаток до вуглецево-азотного балансу, наявність таких мікроелементів, як залізо, молібден, нікель, кобальт та селен, необхідна для здійснення стабільного та ефективного процесу анаеробного бродіння сировини [60].

Кінцевим продуктом анаеробного бродіння є 60-70% метану, 30-40% вуглекислого газу, 0-3% домішок сірководню, водню, аміаку та оксидів азоту в біогазі.

Кількість біогазу, яке може бути виділено з різних сільськогосподарських відходів, залишків і сумішей при оптимальних умовах анаеробної обробки, залежить від кількості субстрату, умов процесу, бактеріального складу в реакторі і т. д.

В Україні навіть на невеликій фермі можна впровадити просту і досить ефективну систему анаеробного зброджування. Але найбільш рентабельними є великі біогазові установки (обсяг метану не менше 800 м³). Така система може бути побудована на фермах великої рогатої худоби з поголів'ям від 600 голів, свинарських фермах від 6000 голів, птахофабриках з поголів'ям від 20 млн голів, цукрових, молочних виробництвах, лікєро-горілчанних заводах та інших підприємствах харчової промисловості [60]. На великих біогазових установках можна організувати механізацію і автоматизацію процесу, що означає оптимізацію його параметрів і забезпечення стабільної подачі біогазу на когенераційні установки, що виробляють електричну і теплову енергію. Вартість імпортного обладнання, необхідного для створення систем анаеробного зброджування, для наших споживачів висока. Але при повному або частковому оснащенні обладнання побутовою технікою його ціна може бути значно знижена і, відповідно, скорочений термін окупності.

За допомогою технології анаеробного зброджування сільськогосподарських і органічних побутових відходів можна отримувати біогаз з високим вмістом метану. Однак його виробництво, засноване на місцевих сировинних ресурсах, зазвичай обходиться дешевше. Крім того, анаеробне зброджування є

переривчастим процесом, що ускладнює контроль складу газу, що утворюється.

1.3.3. Обґрунтування спалювання відходів біомаси

Пряме спалювання є одним із методів, що використовуються для переробки деревини та біомаси, таких як відходи деревини, солома, тверді побутові відходи та сухі добрива

Основні хімічні елементи, що входять до складу деревної тріски, складають, в % (по масі) від сухої речовини: вуглець - 50, кисень - близько 40, водень - 5,7. Концентрація азоту становить менше 1%, хлору і сірки - менше 0,1%, золи - близько 1% [61]. Теплота згоряння при вологості 40% еквівалентна 10,5 МДж/кг [61-62].

Останнім часом для виробництва деревного палива використовуються спеціально вирощені швидкозростаючі насадження (верба, тополя, евкالیпт). Вологість деревини та кори сильно варіюється від 2 до 75% [54-55]. Це пояснюється не тільки наявністю води в структурі біомаси, а й впливом пори року, місця зростання і способу зберігання і транспортування деревини. З підвищенням вологості знижується низька теплота згоряння. Таким чином, при вологості деревної тріски 0, 40 і 60% (по масі) Q рівні 19, 10,5 і 6 МДж/кг відповідно [54-55].

Технології спалювання деревної біомаси включають [61,63,81,85]: спалювання у вихровій (циклонічній) печі, спалювання розпиленої сировини в пальнику, спалювання на колосникових ґратах, спалювання подрібненого деревного палива, спалювання в газогенеруючій печі, спалювання в псевдозрідженому шарі і спалювання в циркуляційному шарі.

Вихрова піч призначена для спалювання частинок біомаси розміром до 10-12 мм, таких як соняшникова, гречана або рисова лушпиння. Вихровий спосіб має досить високими технічними та екологічними (з точки зору зі) показниками процесу *Gorenje*, можливістю його реалізації в топках невеликої кількості легкопаливних котлів.

Спалювання в вихровий пальнику використовується для дуже дрібних і сухих деревних відходів (вологість до 20%), наприклад, в вихровий пальнику можна спалювати тирсу і дрібний пил. Переваги цієї технології: потужність котла використовується більш ефективно, гарантується високий ККД котла, можна спалювати газ або мазут в тій же пальнику, що і біомасу. Цей спосіб пов'язаний з високими витратами, так як вимагає попереднього подрібнення і сушіння сировини. Тому спалювання в вихровий пальнику економічно не вигідно.

Пряме спалювання відбувається в печах з горизонтальними, конічними, похилими або рухомими колосниковими ґратами. Цей метод застосовується в малопотужних (менше 20 МВт) водогрійних котлах і печах для спалювання деревного палива, в тому числі з підвищеною вологістю: кускових відходів, тріски, кори, тирси, паливних брикетів і гранул і т.д. для автоматичного спалювання подрібнених відходів також використовуються трубчасті пальники зі шнековою подачею.

Спалювання в псевдозрідженому циркулюючому шарі забезпечує більш низький рівень викидів відходів при спалюванні в порівнянні з прямим спалюванням, більшу ефективність і економію за рахунок спалювання майже 100% палива Gogenje цей метод для вироблення електричної і теплової енергії використовується в комерційних або муніципальних котельнях на теплових електростанціях потужністю 5~ 600 МВт.

Спалювання газу у вторинній камері згоряння (газогенераторі) являє собою двоетапний процес. На першому етапі паливо подається за допомогою шнека на похилу решітку в первинній камері (попереднє нагрівання), де воно нагрівається до температури, при якій відбувається процес газифікації. Перегрітий і змішаний з вторинним повітрям, деревний газ згорає у вторинній камері практично без залишку. Вихлопні гази використовуються в котлах для виробництва електроенергії. Діапазон потужності таких систем спалювання становить від 150 кВт до 30 МВт. Недоліком є висока вартість.

При спалюванні пилоподібного палива використовується спеціальний пальник, призначений для спалювання деревного пилу, що утворюється в

процесі виробництва, або з вихідних деревних відходів в результаті дроблення деревних відходів в пил, весь процес дроблення, подачі і спалювання пилу в пил з вологістю близько 8% повністю автоматизований. Використання тільки деревного пилу для отримання енергії використовується рідко. Це паливо зазвичай використовується в котельних або теплових електростанціях, які працюють на вугільному пилу або торфі. Недоліком також є висока вартість комплектного обладнання для спалювання деревного пилу.

Для спалювання соломи використовуються фермерські солом'яні котли потужністю 1 МВт. Вони поділяються на котли періодичної дії і котли з автоматичним завантаженням сировини. Більшість звичайних фермерських котлів призначені для спалювання солом'яних брикетів середнього і великого розміру.

Для поліпшення умов процесу Gorenje і зменшення викидів частинок у продуктах Gorenje, рівномірного горіння соломи брикетів можна досягти шляхом поступового переміщення регульованої зони подачі повітря таким чином, щоб швидкість потоку повітря поступово змінювалася від верхньої частини котла до нижньої. Для забезпечення повного перемішування продуктів згоряння повітря повинен подаватися в напрямку, протилежному напрямку виходу димових газів з топки котла (він повинен подаватися горизонтально з того ж кінця топки, де розташований вихід димових газів, або вертикально зверху вниз від нижньої частини труби з котла). з якого виходять продукти згоряння). Вологість соломи не повинна перевищувати 15-18%, ККД котлів періодичної дії - близько 75%, а рівень вмісту CO в продуктах згоряння - менше 0,5% [61-63].

Котли з автоматичним завантаженням відрізняються тим, що до складу установки входить дозуючий пристрій, який автоматично і безперервно подає соломі в котел. Є дозуюче обладнання для брикетів з цільної соломи, подрібненої соломи і солом'яних гранул.

Використання соломи для безпосереднього спалювання є одним із способів зменшити викиди CO₂ в атмосферу.¹ Солома, як і біомаса в цілому, є нейтральним по відношенню до CO₂ паливом, тобто споживання вуглекислого

газу з атмосфери під час росту зерна відповідає викиду CO₂ в атмосферу при спалюванні соломи. Враховуючи додаткові викиди вуглекислого газу, що утворюються при збиранні, транспортуванні та підготовці соломи до спалювання, скорочення викидів CO₂ при заміні вугілля, що спалюється в котлах, соломою становить близько 90%.

Однак соломинку нелегко використовувати як паливо як на етапах збору, транспортування та зберігання, так і на етапі безпосереднього спалювання. Це пов'язано з нерівномірністю продукту, відносно високою вологістю, низьким об'ємним вмістом енергії, досить низькою температурою плавлення золи і підвищеним вмістом хлору, тому кількість соломи і вугілля з однаковим вмістом енергії відрізняється приблизно в 10-20 разів.

Вихід летких компонентів при спалюванні соломи (близько 70%) вимагає особливих вимог до розподілу і перемішування повітря, що надходить в зону горіння, а також до конструкції топок котлів [15].

1.3.4. Обґрунтування способу піролізу

Крім прямого спалювання і газифікації, піроліз є ефективним методом термохімічної переробки рослинної біомаси, промислових і побутових відходів, і в той же час біомаса за цією технологією являє собою високоякісне і екологічно чисте тверде, рідке і газоподібне паливо, що містить практично всі сировинні матеріали (включаючи полімери штучного походження), що містять органічні компоненти, оскільки використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє невелика кількість забруднюючих речовин. Це дозволяє отримати максимальну віддачу від свого життя.

Піроліз-це процес піролізу органічних сполук без доступу кисню, в порівнянні з процесами газифікації (800-1300 °з) і Gorenje (900-2000 °з), Сучасний біомаси піролізного технології при порівняно низьких температурах до 800°з, швидкість нагріву (швидкий і повільний піроліз) і середовища, в якій відбувається піроліз (вакуум, зволожує, methanopyrolysis), формування шару,

він може бути класифікований за типом ("киплячому шарі", друккарськими шар-зважений шар, Гарячі повітряні потоки).

У процесі піролізу з твердої біомаси виділяється газоподібна фаза, в результаті чого утворюється газоподібне, рідке і тверде паливо, яке може бути ефективно використано для теплових, електричних та інших цілей [42,54].

Рідкі продукти піролізу мають теплоту згоряння 20-25 МДж/кг і складаються зі складної суміші високоокислених вуглеводнів з вмістом води до 20% (по масі).). Необроблене піротопальне являє собою густу чорну смолисту рідину, вихід якої може досягати 80% від маси сухої сировини (при швидкому низькотемпературному піролізі).

Твердий продукт піролізу являє собою вуглецевмісний матеріал з теплотою згоряння 30 МДж/кг, вихід якого при карбонізації і повільному піролізі досягає 30-35% від маси сухої сировини.

Газоподібними продуктами піролізу зазвичай є середньокалорійні гази з теплотворною здатністю 15-22 МДж/м³, а при частковій газифікації ~ низькокалорійні гази $Q=4-8$ МДж/м³. При високотемпературному швидкому піролізі вихід газоподібного палива може досягати 70% від маси сухої сировини. Склад газу залежить від сировини і технологічних параметрів. Використання гарячих газів підвищує теплотворну здатність. Такі гази зазвичай використовуються в самому процесі піролізу для підтримки температури процесу та сушіння сировини.

У складі продуктів піролізу виявлені сотні хімічних компонентів. Все більше уваги приділяється регенерації окремих сполук (левоглюкозану та гідроксиоцтових альдегідів) або їх сімейств (поліфенолів) з продуктів піролізу [64]. Чим вище значення окремих хімічних продуктів порівняно з паливом, тим вигідніше отримувати ці продукти навіть при низьких концентраціях.

Швидкий піроліз зарекомендував себе як технологія термохімічної переробки біомаси, що володіє значним потенціалом, особливо для отримання рідкого палива і хімічних продуктів з високим виходом. Цей тип піролізу використовується для отримання максимальної кількості газу або рідини залежно від заданої температури процесу. Низькотемпературний швидкий

піроліз дозволяє максимально збільшити кількість рідких продуктів. Швидкий піроліз є основним термохімічним методом отримання рідин безпосередньо з біомаси та відходів.

Технологія піролізу має найбільший потенціал для отримання енергії з біомаси з метою отримання піролізного палива з високим виходом, яке легше транспортувати і дешевше, ніж саму біомасу. Піротопальне володіє високою енергетичною цінністю - 28 ГДЖ/м³ - 2 ГДЖ/м³ (для соломи) і 8 ГДЖ/м³ (для деревної тріски) в порівнянні з сировиною [64,67]. Процес піролізу є енергетично автономним і використовує гази та тверді продукти, які виробляють тепло, необхідне для сушіння самого процесу та біомаси.

У таблиці 1.10 наведені характеристики піролізного палива, одержуваного в результаті швидкого піролізу [82-84].

Погіршення якості піролізного палива відбувається при температурах вище 100°C, що негативно позначається на фізичних властивостях рідини (збільшення в'язкості, поділ фаз, відкладення бітумоподібних відкладень внаслідок полімеризації), а для зниження в'язкості піролізного палива при перекачуванні і розпиленні використовують воду, метанол або етанольний спирт підігрівається і додається. При контакті з повітрям якість палива також знижується, але в меншій мірі, ніж при підвищенні температури. Якість піролізного палива, одержуваного шляхом піролізу біомаси, може бути недостатнім для використання в комерційних цілях (в двигунах). Головною особливістю, що погіршує якість піролізного палива являється високий вміст кисню - 25-40%.

Склад піропалива

Параметри піропалива, %(масс.)	Традиційний піроліз	Швидкий піроліз
C	61,9	52,2
H	6	6,3
O	31,02	41,5
N	1,05	-
S	0,03	-
Вода	26	26
Зола	1,5	-
Смоли	21	59

Підвищення якості рідких продуктів піролізу засноване на традиційних технологіях гідрування або цеолітизації [65,66], спрямованих на зниження вмісту кисню в паливі. Гідрування здійснюється в паровій або рідкій фазі шляхом введення водню в рідину для гідрування, змішану з каталізатором. Обробка піролізом дозволяє знизити вміст кисню до 2,2-3% з тетралін каталізатором і до 4,7% без каталізатора. Крекінг цеоліту заснований на використанні синтетичного цеоліту (водного розчину натрію і алюмосилікату кальцію) [65,66]. Наприклад, коли якість продуктів піролізу деревини та рисового лушпиння покращується за рахунок крекінгу цеоліту, вихід піролізу знижується (крекінг відбувається в присутності водяної пари).

На комерційному рівні жодна з технологій підвищення якості піропального не отримала достовірних даних про масовий баланс розглянутого процесу і роботі обладнання.

В Україні технологія швидкого піролізу практично невідома. Відходи біомаси сільськогосподарського виробництва (солота, стебла та качани кукурудзи, стебла та лушпиння соняшнику, інші відходи біомаси сільськогосподарського виробництва) становлять основу можливостей ВМ

в Україні [54-56]. Використання транспортного обладнання також значно знижує вартість енергії, що виробляється з БМ, оскільки відсутні капітальні та експлуатаційні витрати на брикетування, зберігання і сушку БМ.

При швидкому піролізі рослинних матеріалів, таких як деревина і горіхова шкаралупа, при температурі 800-900°C утворюється 10% твердого деревного вугілля, а 60% сировини перетворюється в газ, що містить велику кількість водню і монооксиду вуглецю.

Швидкий піроліз може конкурувати з традиційним піролізом, але для широкого застосування його потрібно вирішити.

В даний час традиційний піроліз вважається найбільш привабливим видом піролізу. Оскільки використання відносно низької температури означає, що в атмосферу потрапляє невелика кількість забруднюючих речовин порівняно зі спалюванням. Така ситуація дає екологічну перевагу переробці певних видів відходів.

В Україні основним джерелом біомаси є сільськогосподарські відходи.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні [54-56, 89]:

- зернові культури (солома) - 3,63 млн. т у.п./рік;
- кукурудза на зерно (стебло, качани) - 1,19 млн. т у.п./рік;
- соняшник - (стебло, лушпиння) - 2,31 млн. т у.п./рік;
- біогаз із гною - 1,59 млн. т у.п./рік;
- відходи деревини - 1,58 млн. т у.п./рік.

Тому пріоритети полягають у реалізації заходів щодо впровадження новітніх енергоефективних технологій та подальшого розвитку використання нетрадиційної енергетики та альтернативного палива, які можуть забезпечити значний економічний ефект.

Висновки

1. Проаналізовано паливний баланс, і можна відзначити, що в цілому енергетичний потенціал відходів сільського та лісового господарства України еквівалентний 21 млрд м³ природного газу, отже, біомаса може забезпечити близько 10% від загального попиту на первинну енергію (на сьогоднішній день це еквівалентно 2 млрд 2000 млн кубометрів). тонн умовного палива). Таким чином, розвиток цієї складової балансу дозволить у майбутньому перерозподілити співвідношення споживання різних видів енергії, тобто збільшення частки нетрадиційних енергоносіїв, зокрема біопалива, супроводжуватиметься значним скороченням споживання твердого палива, газу та нафти.

2. Виробництво біопалива сприяє скороченню дефіциту традиційних вітчизняних видів палива та енергетичних ресурсів. Це дисбаланс у розвитку енергетичних комплексів, які зосереджені на виробництві критично важливої енергії на атомних електростанціях, і може виникнути реальна нестача виробничих потужностей для придбання, переробки та вторинного використання ядерного палива та відходів.

3. Як в результаті аналізу технології переробки біомаси було встановлено, що процес газифікації біомаси ще не отримав широкого комерційного поширення, незважаючи на дослідницькі та проектні роботи, що проводяться в багатьох країнах в цій області.

4. Використовуючи технологію анаеробного зброджування сільськогосподарських і органічних побутових відходів, можна отримувати біогаз з високим вмістом метану. Однак його виробництво, засноване на місцевих сировинних ресурсах, зазвичай обходиться дешевше. Крім того, анаеробне зброджування є переривчастим процесом, що ускладнює контроль складу газу, що утворюється.

5. Ін крім прямого спалювання і газифікації, піроліз є ефективним методом термохімічної переробки рослинної біомаси, а оскільки використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє невелика

кількість забруднюючих речовин, можна отримувати високоякісне і екологічно безпечне тверде, рідке і газоподібне паливо практично з мінімальними витратами. вся сировина містить органічні компоненти.

6. Доцільність створення нових технологій визначається сприятливими екологічними умовами для використання відновлюваних джерел енергії та наявністю промислових баз.

Тому в роботі пропонуються дослідження технології виробництва паливного газу з частковою або повною заміною викопних видів палива.

2 ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМИ ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА

Для вивчення процесу піролізу була створена пілотна установка, показана на малюнку 2.1. Установка являє собою U - подібну піролізну камеру (2), її внутрішній діаметр становить 100 мм, загальна довжина-5,7 м, а повітря, попередньо нагріте електронагрівачем (1), подається в нижню частину піролізної камери. Повітря проходить через багат шарове керамічне кільце, що призводить до вирівнювання профілю швидкості повітря по перетину труби. Відходи біомаси подаються в камеру піролізу за допомогою дозуючого шнека (3). Конструкція шнекового дозатора дозволяє регулювати швидкість подачі і забезпечує герметичність завантаження. На вході в камеру піролізу встановлений датчик поточного вологоміра (7). Таким чином, сировина подається дозуючим шнеком в зону нагріву камери (8) видалення вологи (9) і під час свого переміщення проходить через зону дії датчика (7) вологості. Електричний сигнал датчика вологості надходить в перетворювач (10) для формування сигналу управління механізмом подачі органічної сировини (4).

У камері піролізу організовані супутні підйому руху частинок і повітря. Швидкість повітряного потоку перевищує швидкість частинок біомаси в 1,5-2 рази. Під час руху газозвісі відбувається сушка, нагрів і частковий піроліз біомаси. Циклон (5) встановлений на виході з камери, де відбувається поділ газоподібної і твердої фаз. Тверді частинки потрапляють в бункер циклону (6), де в подальшому летючі компоненти виділяються в щільний шар до повного розкладання. Суміш повітря і легких продуктів піролізу становить 85%, яка відводиться димовим насосом в димохід, а 10% від загальної газової суміші повертається для концентрування отриманого газу і підвищення теплотворної здатності.

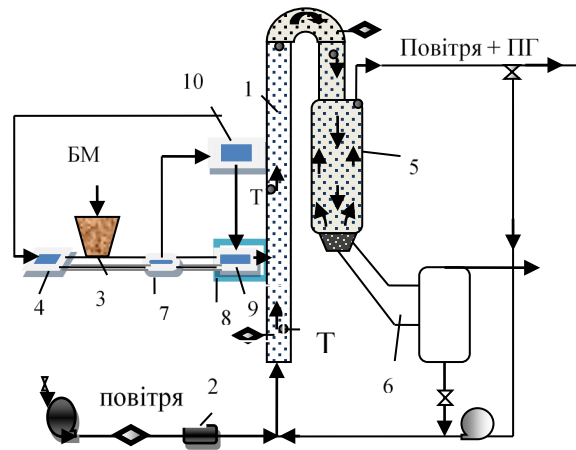


Рис. 2.1 Технологічна схема піролізної установки

Для того, щоб запобігти конденсації смол, що входять до складу летких продуктів піролізу, циклон, камеру піролізу, бункер і трубопроводи за якими проходить паливний газ, виконані теплоізольовані.

Експериментальні дослідження процесу термічної переробки біомаси проводилися в наступному порядку:

- перша стадія - розігрів всієї системи; визначення вологості відходів біомаси;
- друга стадія - завдання технологічних параметрів (витрати повітря і біомаси, температура підігріву повітря), що визначають показники процесу;
- третя стадія - встановлення стаціонарного режиму процесу (до 15 хвилин) і визначення основних показників - склад суміші повітря і продуктів піролізу, температур по висоті камери піролізу;
- четверта стадія - завершення процесу і визначення теплового балансу.

Вологість надходить на переробку сировини та варіюється в широких межах (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

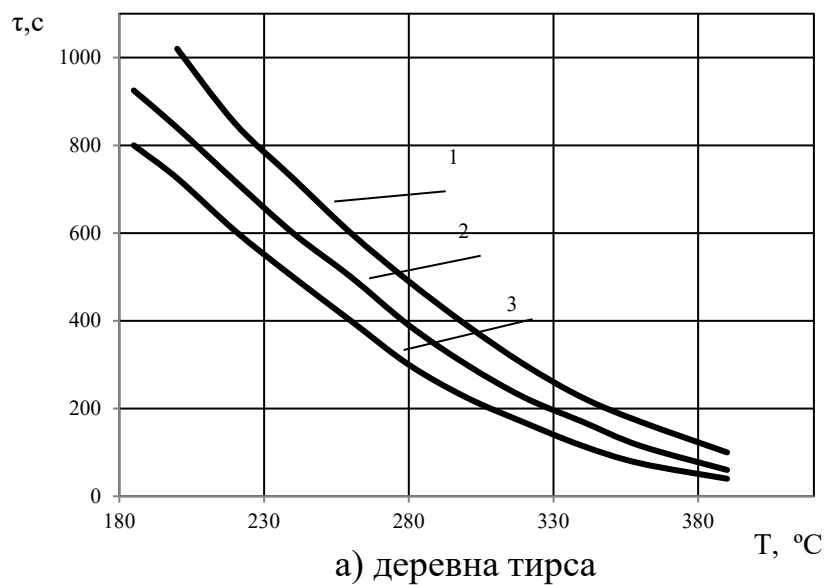
Енергетична цінність досліджуваних видів біомаси

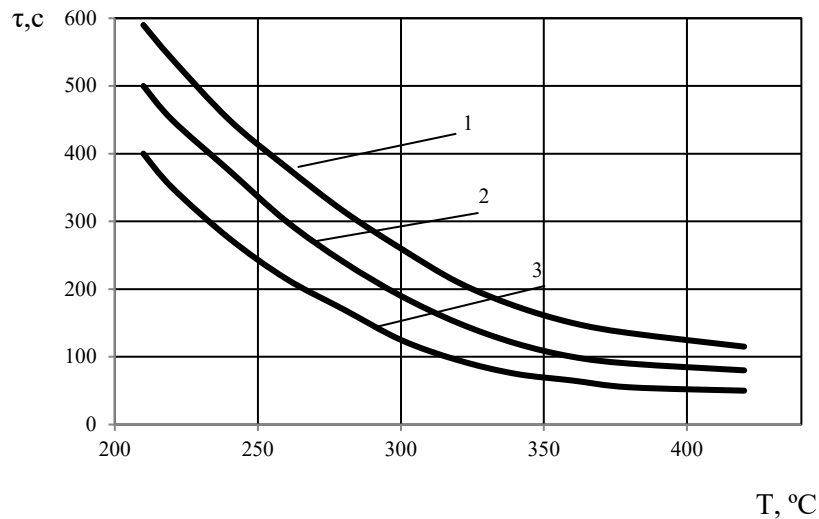
Вид	Вологість, %	МДж/кг	кВтч/кг
Деревна тирса	20	14.1	3.9
	6	18.2	

Гречане лушпиння	12	13.8	3.8
	2	17.9	
Рисове лушпиння	12	14.3	3.9
	2	18.5	
Лушпиння соняшнику	17	14.2	3.9
	4	18.3	

2.1 Дослідження вологості рослинної речовини

З метою апробації вологоміра провели вимірювання вологості біомаси (тирси, лушпиння соняшнику) з вмістом води 1-40%. Результати досліджень представлені на графіках (рис.2.2) для кожного виду біомаси.





б) лушпиння соняшнику

Рис. 2.2. Залежність нагріву рослинних відходів з різною вологою

1-вологість 40%;

2 – 20%; 3 – суха частинка

Аналіз показав, що для здійснення процесу піролізу необхідно зниження вологості сировини, так як від рівня вологості сировини, яка надходить в піролізну камеру, залежить енергоємність процесу. Оскільки процес сушіння біомаси включений в технологічну схему піролізної установки, то необхідно узгодження режимів сушки і піролізу.

Випробування показали, що застосування погонного вологоміра, дозволяє істотно підвищити ефективність роботи установки до $18,5 \text{ МДж/м}^3$, а також збільшується вихід піролізного газу до 85%.

2.2 Експериментальні дослідження якості піролізного газу

Відомо, що температура має великий вплив на перебіг процесу піролізу, в результаті якого сировинна маса розкладається з утворенням газоподібного продукту. Вибір оптимального значення температури визначає ефективність процесу термообробки відходів біомаси, таких як рисова і гречана лушпиння, лушпиння соняшнику, тирса і лушпиння волоського горіха. 1. Таким чином, одним із завдань, вирішених в роботі, був пошук якісної функціональної залежності між теплоенергетичними параметрами піролізного газу і

температурою теплоносія. Найбільш важливими параметрами паливного газу є теплота згоряння і склад продуктів згоряння, які залежать від складу горючих газів (складу продуктів піролізу). Хроматографічні дослідження газового складу є одним з ефективних аналітичних методів, що дозволяють отримати цю залежність експериментальним шляхом.

2.2.1 Визначення складу газу

Для хроматографічного аналізу складу продуктів піролізу було розроблено лабораторне обладнання (рис. 1).2.3), реалізоване у вигляді комплексу апаратних і програмних засобів, що представляють собою автоматизований процес збору, обробки і візуалізації експериментальних даних в режимі реального часу. Суть цього аналізу полягає у фізичному розподілі газових сумішей за окремими компонентами, заснованому на відмінностях в їх фізико-хімічних властивостях [5].

Через розділову колонку 3, що містить нерухому фазу з великою поверхнею, з постійною швидкістю пропускається потік газу-проявника. Досліджувана газова суміш з реактора 1 вводиться через дозуючий пристрій 2 в потік проявника і разом з ним фільтрується через шар адсорбенту.

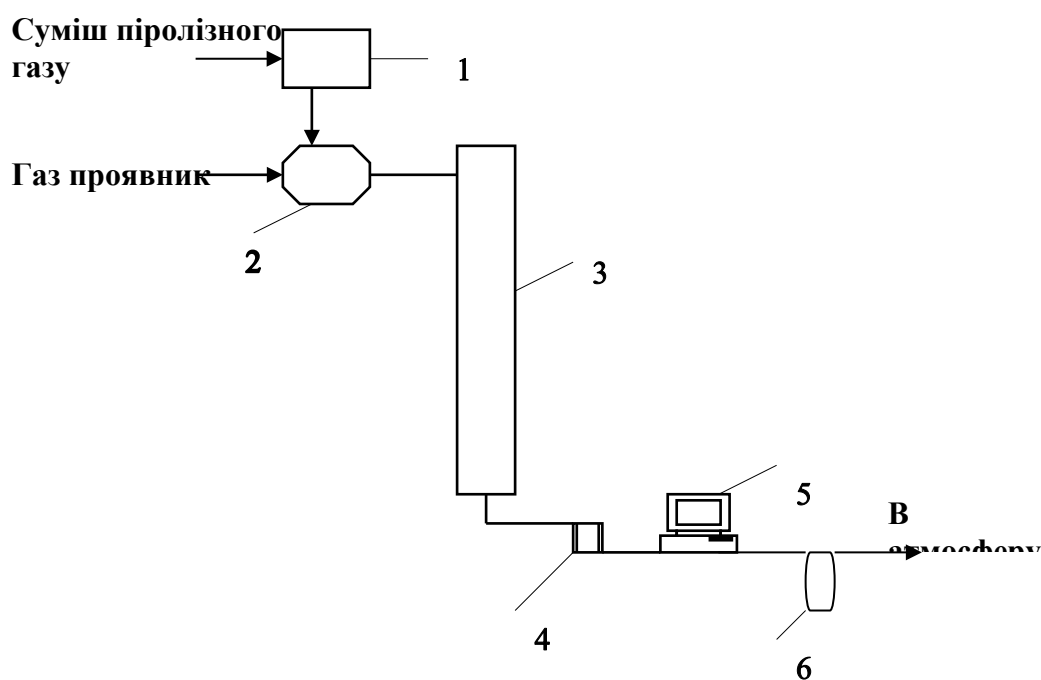


Рис. 2.3 Експериментальна установка

1-реактор; 2- пристрій для введення проби;
3-хроматографічна колонка;
4-детектор; 5-обчислювальна машина; 6-реометр.
2.1.2 Програмне забезпечення для управління хроматографом

Для хроматографічного аналізу на базі пакету CRW-DAQ розроблена спеціальна комп'ютерна програма. Програма забезпечує управління збором даних, обробку апаратурних кривих кондуктометричного (катарометра) і іонізаційного детекторів, розрахунок складу суміші і збереження, як первинних даних, так і кінцевих результатів аналізу. Вид завантаженої програми показаний в додатку 1.

Обчислення концентрацій компонентів виконується в наступному порядку. У загальному вигляді, вважається, що існує 5 піків по катарометров: 0...4=H/N/CO/CO₂/H₂S.

Концентрація і-го компонента (кожного з них) при відсутності помітної частки домішок, визначається з формули:

$$C_i = \frac{K_i \cdot S_i}{\sum_H K_i \cdot S_i} \cdot 100,$$

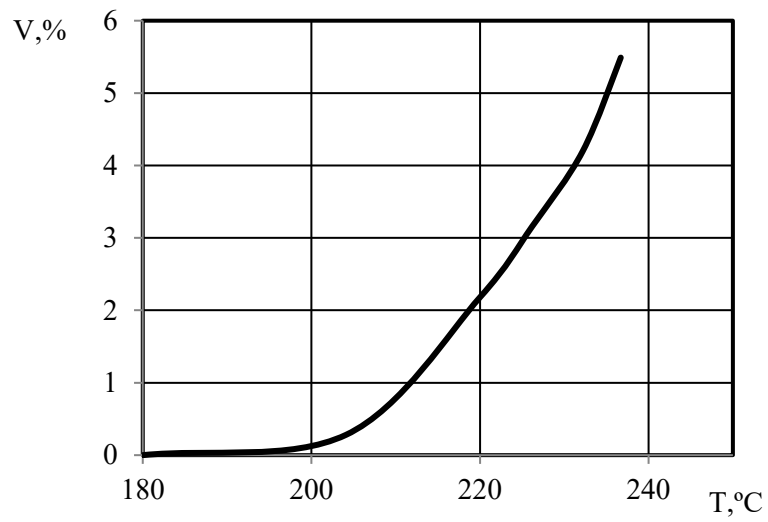
де C_i – концентрація компонентав аналізованої суміші;

S_i^{kat} - площа пику кривої катарометра і-го компонента;

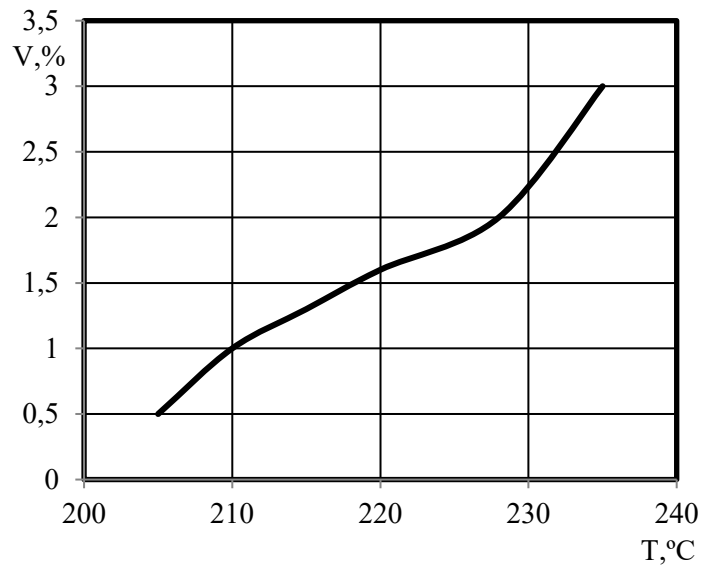
K_i – коефіцієнтчутливостікатарометра для і-їмолекулигазу.

Результат хроматографічного аналізу газової суміші зберігається на установці в текстовому файлі, представлений в додатку 2.

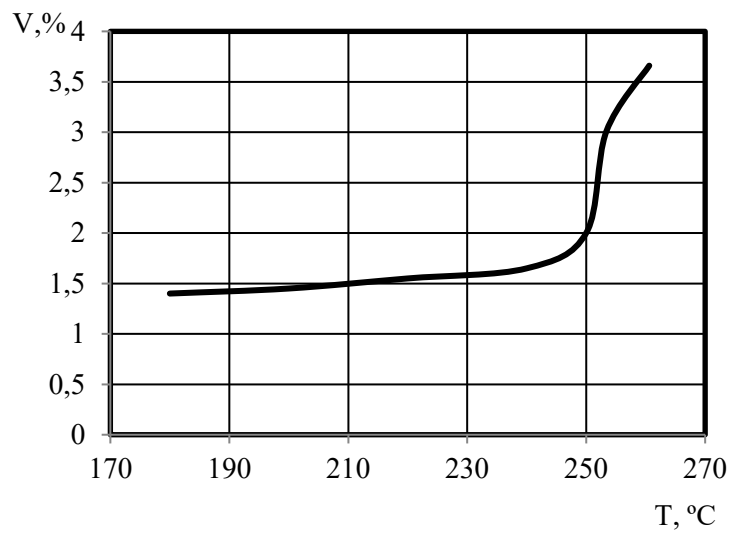
На підставі експериментальних даних хроматографічного методу отримуємо квазістатичний вихід летючих компонентів при термічному розкладанні частинок біомаси (рис 2.4 - 2.6).



а) водень

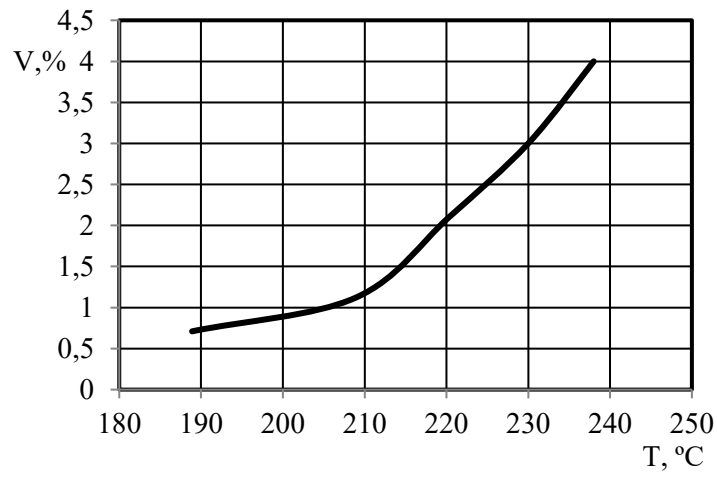


б) метан

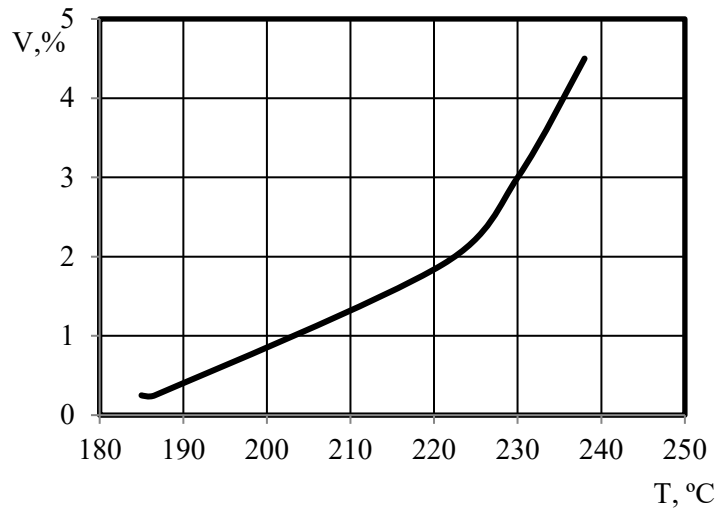


в) важкі вуглеводні

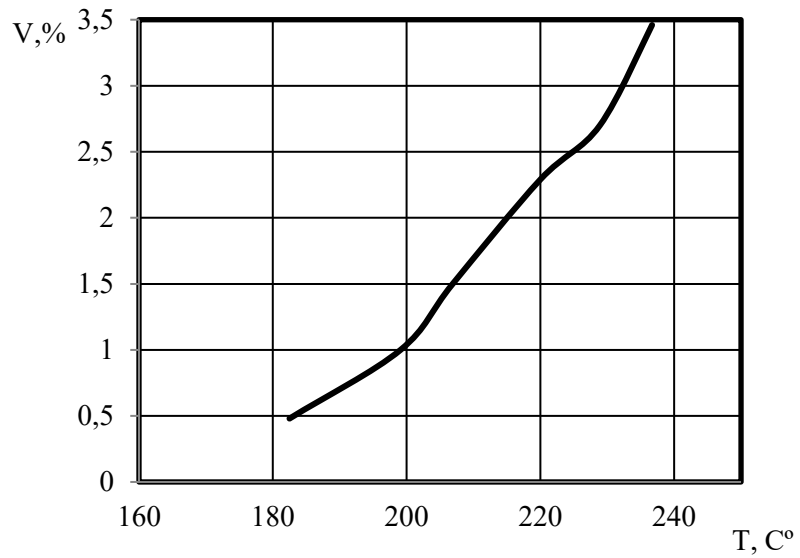
Рис. 2.4 Вихід летючих компонентів газу



а) оксид вуглецю



б) вуглекислий газ



в) азот

Рис.2.5 Вихід летючих компонентів газу

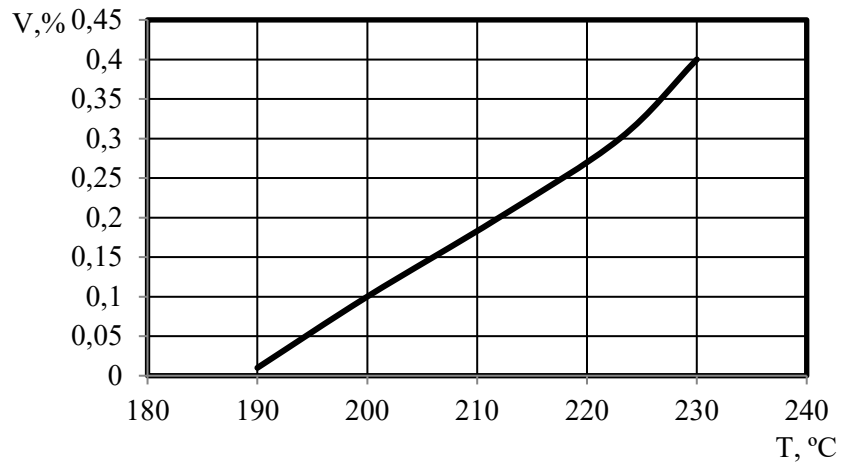


Рис. 2.6 Вихід сірководню з частинок біомаси

Із збільшенням температури піролізу з 200 по 500 °C буде збільшуватись вихід газу, в основному за рахунок збільшення складу водню, метану і незначно від важких вуглеводнів. А в діапазоні температур 280-500 °C відбувається помітне зменшення виходу двоокису вуглецю і азоту, не бажаних домішок в паливному газі.

В результаті, по експериментальним залежностям (рис. 2.4 - 2.6) виходу 10% летких компонентів відповідає умовній температурі 220 °C. Цій температурі відповідає вихід летючих продуктів представлених в таблиці 2.2:

Таблиця 2.2

Склад летючих компонентів

H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂	C _n H _m	H ₂ S	A
2,27	1,62	2,08	1,912	0,229	1,554	0,265	0,07

Тоді склад паливного газу визначається відношенням:

$$V_i = 10r_i$$

Склад дослідного зразка газу представлено в таблиці 2.3 :

Склад піролізного газу

H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂	C _n H _m	H ₂ S	A
22,7	16,2	20,8	19,12	2,29	15,54	2,65	0,7

Отримуємо залежність сумарного виходу летючих в часі представленої на рис.2.7.

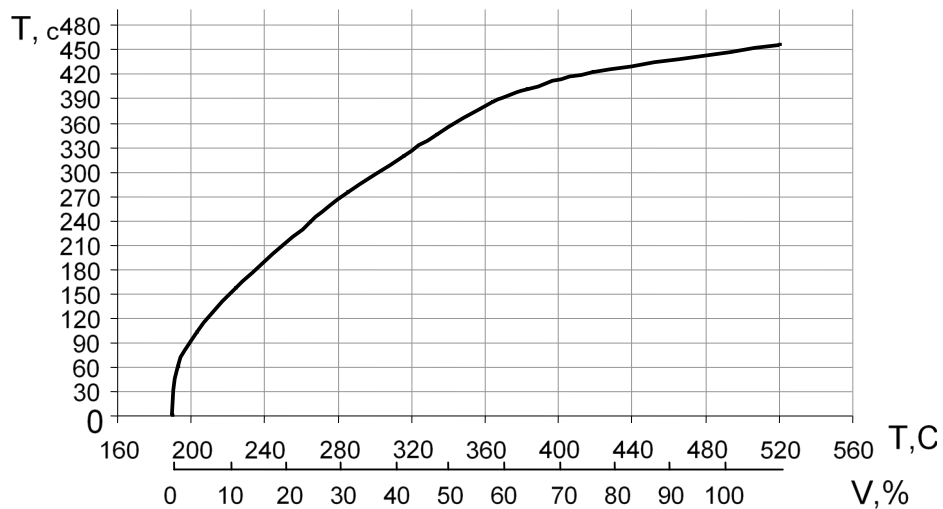


Рис.2.7. Сумарний вихід летючих з частинок біомаси

Отримані експериментальні дані про кінетику піролізу біомаси в умовах нагріву свідчать про те, що виділення окремих компонентів з усього газу складним чином залежить як від часу процесу, так і від температури. У той же час характер відповідної закономірності різний для кожного компонента. Тому в наступних розділах розглядаються умови, які повністю описують всі аспекти процесу піролізу різних типів частинок біомаси.

Висновки

1. При дослідженнях технологічного процесу виявлено, що є необхідністю встановлення пристрою для вимірювання вологи біомаси. Тому, що більш волога сировина вимагає більш високих енергетичних витрат на

одиницю маси сировини, що досягається шляхом збільшення температури обробки або часу її впливу на органічну речовину.

2. Випробування показали, що застосування погонного вологоміра, дозволяє істотно підвищити ефективність роботи установки до 18,5 МДж/м³, а також збільшується вихід піролізного газу до 85%.
3. Хроматоргафічним методом визначено склад піролізного газу (таблиця 2.3).
4. З ростом температури об'єм піролізного газу в повітряно-газовій суміші, збільшується, це пов'язано з більш повним розкладанням частинок біомаси.
5. Так в порівнянні з обсягом газової суміші при температурі 220 °С, обсяг піролізного газу при температурах 260, 320, 380 і 420 збільшується відповідно в 1,04; 1,21; 1,3 і 1,61 рази.
6. Кількість вуглеводнів в одержуваній газової суміші з ростом температури також зростає і досягає максимуму при температурі 420 °С, перевищуючи це значення відповідає температурі 200 °С в 2,1 раз.

3 МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗА

3.1 Рівняння теплового балансу установки

Тепловий баланс у процесі проектування установок має велике значення в цілях визначення витрати теплової енергії для переробки рослинних відходів. В піролізній камері, де є термічне розкладання біомаси, необхідна певна витрата теплової енергії, яка підтримує температурний режим переробки біомаси. Тому важливі задачі енергозбереження та оптимізації піролізних установок лежать в основі моделювання теплового балансу (рис.3.1).

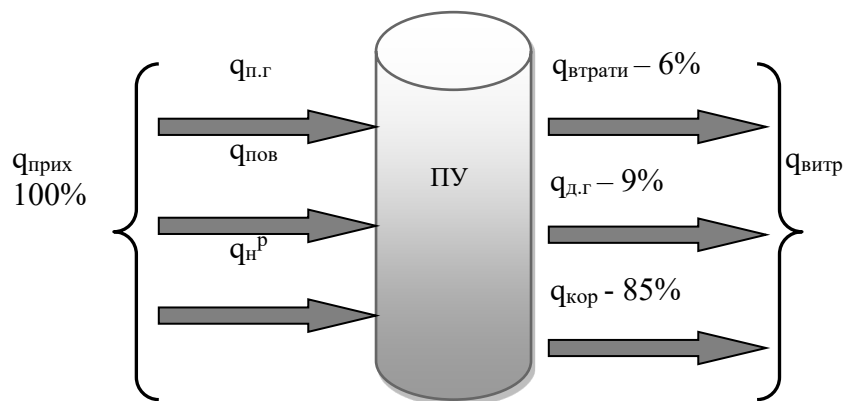


Рис. 3.1 Схема теплових потоків в піролізній установці

Отже, співвідношення загального тепла, корисного тепла і тепловтрат в камері піролізу визначається тепловим балансом циліндричної камери піролізу (труби):

$$q_{\text{прих}} = q_{\text{расх}}, \quad (1)$$

де $q_{\text{прих}}$ – питомий прихід тепла, кДж / кг;

$q_{\text{расх}}$ – питома витрата тепла, кДж / кг;

Визначимо тепловий баланс піролізної труби:

$$q_{\text{расх}} = q_{\text{кор}} + q_{\text{д.г}} + q_{\text{вт.от}} + q_{\text{вт.х}} + q_{\text{вт.м}} + q_{\text{вт.к}}, \quad (2)$$

де $q_{\text{кор}}$ – корисне теплове використання від біомаси, кДж / кг;

$q_{d.z}$ – втрати тепла з димовими газами, кДж / кг;

$q_{вт.от}$ – втрачене тепло в оточуюче середовище, кДж / кг;

$q_{вт.x}$ – втрата тепла від хімічного неповного розкладання піролізу, кДж / кг;

$q_{вт.m}$ – втрата тепла від механічного неповного розкладання піролізу, кДж / кг;

$q_{вт.k}$ – витрати тепла на утворення коксу, кДж / кг.

Якщо ми припустимо, що при спалюванні газу, що утворюється золота немає, ми приймемо $q_{вт.m} = q_{вт.k} = 0$.

Надходження тепла можна визначити за такою формулою:

$$q_{прих} = q_n^p + q_{n.z} + q_{нов} + q_b$$

де

q_n^p – нижча теплота згоряння палива, кДж / кг;

$q_{n.z}$ – теплота піролізного газу, який відбирається для збагачення цього ж газу, кДж / кг;

$q_{нов}$ – теплота повітря, кДж / кг;

q_b – теплота біомаси, кДж / кг.

Враховуючи, що близько 10% газу видаляється для збільшення тепловиділення піролізного газу, а теплою біомаси можна знехтувати, ми отримуємо наступну формулу:

$$q_{прих} = q_{расх} = q_n^p + 0,1q_{n.z}$$

Тоді ефективність піролізної установки буде наступною::

$$\eta = \frac{q_{кор}}{q_n^p}$$

або

$$\eta = 1 - \frac{q_{d.z}}{q_n^p} - \frac{q_{вт}}{q_n^p} - \frac{1}{0,1q_{n.z}}$$

$$q_{вт} = q_{вт.x} + q_{вт.m}$$

Згідно з попередніми розрахунками та експериментальними даними, тепловтрати в навколишнє середовище [] становлять 6% від низької теплоти згоряння палива, тобто $\frac{q_{кор}}{q_n^p} = 0,06$, $q_{d.z} \approx 9...10\%$

Температура димових газів визначається за наступним рівнянням:

$$T_{d.z} = T_1 + \Delta T = T_1 + (100...150)$$

ΔT_1 – температура на вході в піролізную трубу, К

ΔT – різниця температур на вході теплоносія та біомаси, К.

$$T_{\text{д.з.}} = 673 + 100 = 773 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Потім знайдіть корисну кількість використовуваного тепла за формулою:

$$q_{\text{кор}} = q_n^p - q_{\text{д.з.}} - 0,1q_{n.z} - q_{\text{д.з.}}$$
$$q_{\text{кор}} = 18000 - 0,09 \cdot 18000 - 0,06 \cdot 18000 = 15660 \text{ кДж / кг}$$

Отже, ефективність роботи піролізної установки підвищується.:

$$\eta = \frac{15660}{18000} = 0,87$$

4.2 Ексергетичний аналіз

Так як в дипломній роботі була поставлена задача визначити ефективність використання паливного (піролізного) газу, тому необхідно виконати ексергетичний аналіз установки. Цей аналіз виконується в тих випадках, коли на перший план виходять термічні процеси в енергозберігаючих технологіях. Тому необхідно зробити оцінку теплотехнічної ефективності технології використання газоподібного палива.

Запишемо ексергетичний баланс установки по рівнянню:

$$E_{\text{нал}} + E_{\text{нов}} = E_n + \Delta E_{nз} + \Delta E_{oc} + \Delta E_{зз}$$

$E_{\text{нал}}$ – ексергія палива, кДж/кг;

$E_{\text{нов}}$ – ексергія повітря, кДж/кг;

E_n – ексергія пари від вологої біомаси, кДж/кг;

$E_{nз}$ – ексергія продуктів згоряння паливного газу, кДж/кг

E_{oc} – втрати ексергії в оточуюче середовище, кДж/кг;

$E_{зз}$ – втрати ексергії внаслідок незворотності процесу згоряння, кДж/кг

В нашому випадку для підтримання температурного режиму та з метою підвищення теплової здатності, використовуємо частину газу, отриманого в піролізній установці $q_n^p = 18000 \text{ кДж/кг}$.

$$E_{\text{нал}} = 1,04 \cdot q_n^p = 1,04 \cdot 18000 = 18720 \text{ кДж/кг.}$$

При $T_{нов} = T_{ос}$ та $P_{нов} = P_{ос} = 0,1$ МПа; $E_{нов} = 0$.

Ексергія продуктів згоряння палива знаходиться з формули:

$$E_{нз} = q_p^H \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right), \text{кДж / кг}$$

де T_o – температура повітря, К

T_k – температура горіння (діаграма «температура-ентальпія»), К

$$E_{нз} = 18000 \left(1 - \frac{293,15}{2587,15} \right) = 15960,42 \text{кДж / кг}$$

В піролізній камері відбувається процес розкладання біомаси та отримується газоповітряна суміш з температурою 420 °С. Температура запалення біомаси складає 480 °С. Тому ексергія теплоти отриманого пара має вигляд:

$$E_n = q_p^H \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right) = 10964,47, \text{кДж / кг}$$

Втрати ексергії на 1 кг витраченого палива:

$$\Delta E_{nc} = E_{nc} - E_n = 15960,42 - 10964,47 = 4995,95 \text{кДж/кг}$$

Витрати в оточуюче середовище:

$$\Delta E_n = 0,03 q_p^H \left(1 - \frac{T_o}{1550} \right) = 298, \text{кДж / кг}$$

$$E_{зг} = 18720 - 10964,47 - 298 - 4995,95 = 2461,58 \text{кДж/кг}$$

Ексергетичний ККД піролізної камери:

$$\eta = \frac{10964,47}{18720} = 0,58$$

Отже, при зіставленні ексергетичного ККД з тепловим, спостерігаємо, що ексергетичний ККД менше в 1,5 рази за тепловий. Це обумовлено значними витратами при передачі тепла частинкам біомаси. Очевидно, теплота витрачається на стадії сушіння. Тому для збільшення ексергетичного ККД необхідно враховувати вологість біомаси, яка потрапляє в камеру піролізу. Таким чином, ексергетичний аналіз дозволив визначити шляхи збільшення ефективності енерготехнологічних процесів в піролізній камері.

Ексергетична діаграма представлена на рис. 3.2

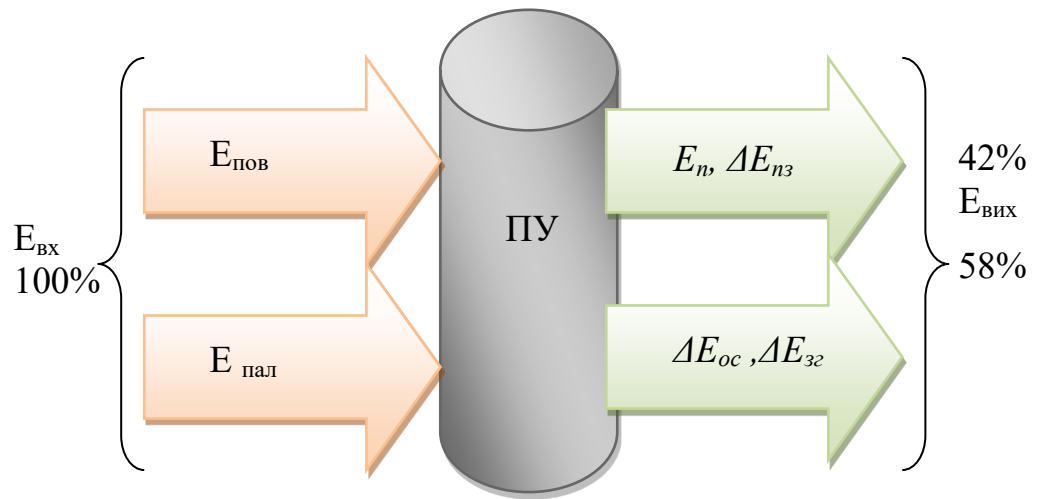


Рис. 4.2 Схема ексергетичного балансу

Отримані результати представлені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Результати моделювання ексергетичного балансу

Підведення ексергії			Відведення ексергії		
Параметр	кДж/кг	%	Параметр	кДж/кг	%
Ексергія початкового палива	18720	100	1. Витрати ексергії продуктами згоряння	4995,95	27
			2. Витрати ексергії в оточуюче середовище	298	1,6
			3. Витрати ексергії при незворотності процесу	2461,58	13,2
			4. Тепло затрачене на видалення вологи	10964,47	58
	18720	100		18720	100

Висновки

1. В результаті моделювання теплового балансу визначили ККД піролізної камери 0,87.

2. Отже, при зіставленні ексергетичного ККД з тепловим, спостерігаємо, що ексергетичний ККД менше в 1,5 рази за тепловий. Це обумовлено значними витратами при передачі тепла частинкам біомаси. Очевидно, теплота витрачається на стадії сушіння.
3. Для збільшення ексергетичного ККД необхідно враховувати вологість біомаси, яка потрапляє в камеру піролізу.
4. Таким чином, ексергетичний аналіз дозволив визначити шляхи збільшення ефективності енерготехнологічних процесів в піролізній камері.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗУ. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТА

Визначення ефективності використання паливного газу полягає в калорійності отриманого палива та в якості продуктів згоряння палива, якщо розглядати з екологічної точки зору.

4.1 Визначення теплоти згоряння палива калориметричним методом

Теплота згоряння газоподібного палива визначалася експериментально за допомогою адіабатичного калориметра моделі АБК-1 (рис. 1). 4.1) він оснащений вбудованим мікропроцесором, який управляє вимірюванням теплоти згоряння палива і дозволяє обробляти отримані дані і архівувати їх.



Рис. 4.1 Калориметр моделі АБК-1

Діапазон зміни тепловиділення складає 13-40 МДж і енергетичний еквівалент калориметра - 5430 ± 330 кДж/К з відносно розширеної невизначеністю значення не більше 0,1%.

Умови проведення дослідів:

- діапазон температури оточуючого середовища від +18°C до +28°C;
- відносна вологість оточуючого повітря від
- 20% до 80%;
- атмосферний тиск від 90 кПа до 106 кПа (680-800 мм рт ст);

- електроживлення від мережі від змінного струм з напругою 220В (+10% - 15%) и частотой (50-+1)Гц

Калориметрична бомба (рис. 1). 3.3) Корпус, з якого виготовлена кришка, між корпусом і кришкою вставлено кільце ущільнювача: за допомогою накидної гайки і контргайки кільце ущільнювача вставляється в корпус, кільце ущільнювача вставляється в корпус, кільце ущільнювача вставляється в корпус,



Рис. 4.3 Калориметрична бомба

У калориметричному посудині і ізолюючої оболонці датчик температури - мідний термометр опору - повинен бути розташований на зовнішній поверхні судини і внутрішньої поверхні оболонки, виключаючи теплообмін між ними.

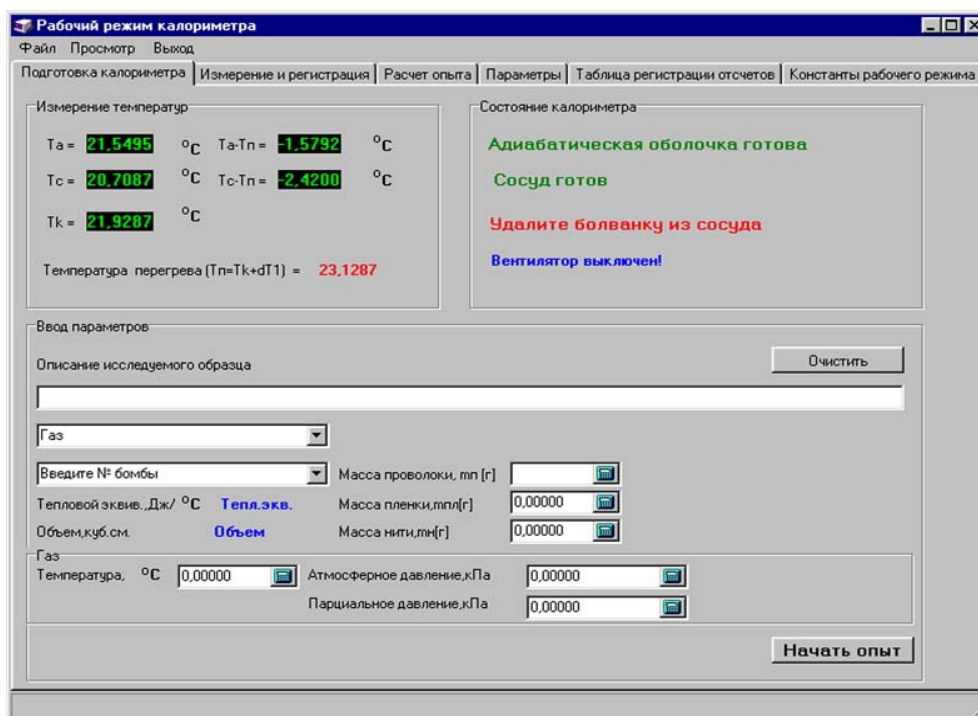


Рис. 4.4 Рабочий режим калориметра

Регулюючи значення Q_6 з урахуванням теплоти утворення азотної кислоти в бомбі і окислення діоксиду сірки в SO_3 і розчинення останнього у воді, отримують більш високу теплоту згоряння, МДж/кг.

$$Q_v^p = Q_6 - 94,3 \times 10^{-2} S_{op+k} - 4,19 \times 10^{-6} Q_6, \quad (2.3)$$

де Q_6 – теплота згоряння по бомбі;

$94,3 \cdot 10^{-2} S_{op+k}$ – теплота, яка виділяється при окисненні SO_2 і SO_3 .

Для того щоб стався звичайний процес займання, необхідно створити в ємності певні умови. По-перше, необхідно ввести в горючі гази достатню кількість повітря і перемішати їх. По-друге, склад газоповітряної суміші повинен знаходитися в межах концентраційних меж займистості. По-третє, вологість досліджуваного палива. По-четверте, необхідно створити певний температурний рівень

4.1.1 Планування досліду

Дані про теплоту згоряння отриманої газоповітряної суміші були оброблені з використанням методу розрахункового експерименту. Умови експерименту наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Умови проведення експерименту

Фактор	Код	Рівні варіювання					Інтервал варіювання, Δ
		-1,414	-1	0	1	1,414	
Температура повітря, °C	X ₁	25	180	335	490	645	155
Зміст вологи в матеріалі, %	X ₂	0	1	20,5	40	59,5	19,5
Витрата повітря, м ³ /ч	X ₃	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,2
Час обробки частинок, ч	X ₄	0	0,001	0,084	0,167	0,25	0,083

В результаті при розрахунку по формулі оцінка дисперсії помилок спостережень:

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (2.13)$$

де Y_i - спостережуване значення показника Y в i -ом повторювальному досліді, а \bar{Y} - середнє значення Y в «нульовій» точці, отримали $S_1^2 = 0,0007$.

Перевірка адекватності отриманих моделей проводилась по критерію Фішера. Розрахункове значення F статистики знаходилось з формули:

$$F_P = \frac{S_{OCT}^2}{S^2}, \quad (2.16)$$

Для отриманої моделі озалишкова дисперсія знаходилась по ормулі:

$$S_{OCT}^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (2.17)$$

де $n=25$ – число дослідів, m – число коефіцієнтів в моделі.

Після обробки результатів випробувань отримано рівняння (2.4) регресії:

$$Y = 6976.946 + 283.42X_1 - 339.77X_2 + 248.28X_3 + 217.07X_4 - 246.9966X_1^2 - 222.0042X_2^2 + 552.7617X_3^2 - 421.9439X_4^2 - 176.25X_1 \times X_2 - 126.25X_1 \times X_3 - 103.75X_1 \times X_4 - 662.5X_2 \times X_3 - 125X_2 \times X_4 - 187.5X_3 \times X_4 \quad (2.4)$$

Вплив вивчених факторів показано на малюнку (рис.4.1)

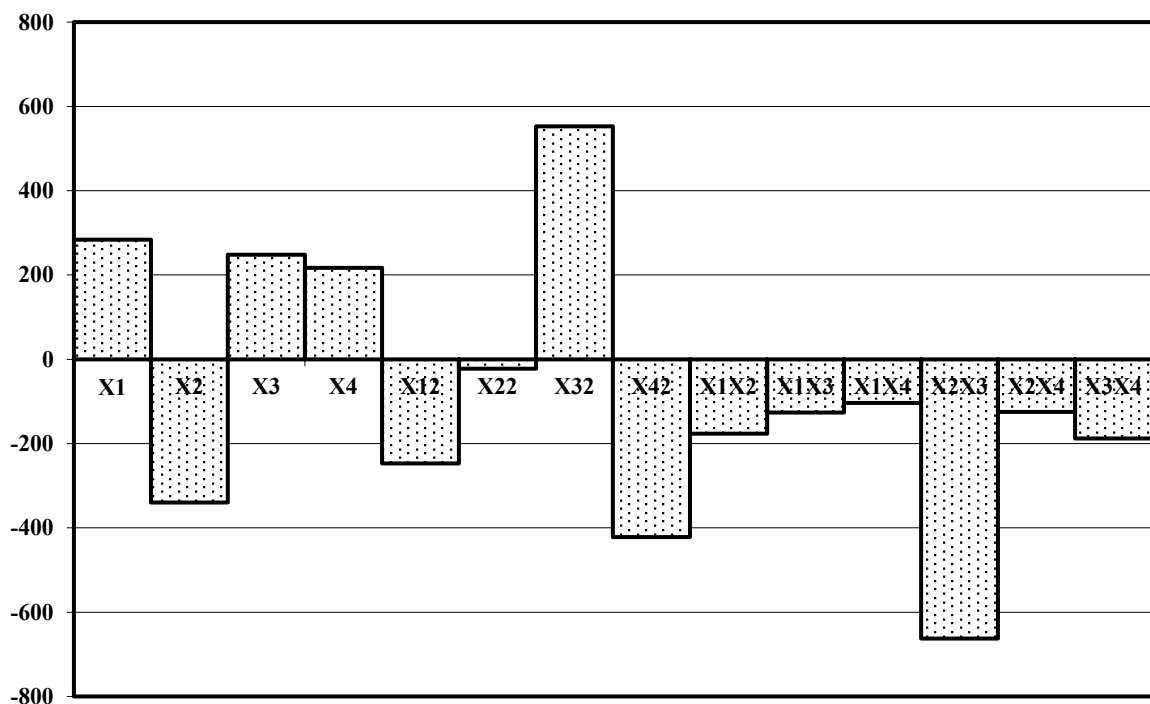


Рисунок 4.1 Діаграма значущості факторів моделі.

Аналіз експериментальних даних показує, що займання газу спостерігалось у всьому досліджуваному діапазоні температур. Очевидно з вищесказаного, що час перебування частинок (фактор X_4) в зоні запалення сприяє збільшенню теплоти згорання, але швидше за все побічно.

Висновки

1. Визначення ефективності використання паливного газу полягає в калорійності отриманого палива та в якості продуктів згорання палива, якщо розглядати з екологічної точки зору.
2. Найбільший вплив на теплоту згорання надає фактор вміст вологи. Очевидно, що зі збільшенням обсягу дискретної фази води, теплота згорання газової суміші знижується, що і відображено якісно і кількісно в результатах експериментів.
3. З підвищенням температури збільшується теплота згорання, оскільки менше енергії витрачається на нагрів палива.
4. Збільшення витрати повітря призводить до збільшення швидкості руху фронту горіння. Це можна пояснити тим, що при збільшенні подачі повітря зростає кількість окислювача, що надходить в камеру піролізу. Це призводить до інтенсифікації окислювальних процесів і росту максимальної температури до 560°C . Як наслідок, зростає кондуктивна складова теплового потоку, в той час як зростання конвективного відведення теплоти із зони піролізу в досліджуваному діапазоні параметрів менш виражений.
5. Займання газу спостерігалось у всьому досліджуваному діапазоні температур. Очевидно, що час перебування частинок в зоні запалення сприяє збільшенню теплоти згорання, але швидше за все побічно.
6. В результаті експериментів отримано теплоту згорання деревної тирси та лушпиння соняшника з вологістю 1-40% в межах 18 – 13 МДЖ/кг відповідно.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Організація охорони праці на підприємствах

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

Проводяться такі інструктажі з охорони праці та безпеки життєдіяльності:

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

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

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

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

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

Спеціалісти з охорони праці мають право:

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

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

4.2.1. Загальні положення

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

Для введення в експлуатацію систем газопостачання населених пунктів, громадських будівель, промислових та сільськогосподарських підприємств, котелень і комунальних підприємств необхідно мати акт приймання об'єкта в експлуатацію, технічний план газопостачальної системи та обладнання, інструкції з безпечного користування газом, план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій, а також паспорт безпеки. Також, у разі потреби, повинні

бути надані документи, що підтверджують навчання та перевірку знань персоналу і робітників.

4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком робіт

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

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

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

Власник підприємства несе відповідальність за забезпечення виконання заходів.

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

4.2.3 Вимоги безпеки праці під час виконання робіт

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

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

Забороняється проводити роботи в приміщеннях, де розміщені газові установки:

- Влаштувати тимчасові електромережі або електропроводку на легкозаймистих основах.

Експлуатувати механічно пошкоджені електроприлади.

Експлуатувати механічно пошкоджені електроприлади;

- Захаращення проїзду до пожежної техніки;

- Куріння, використання легкозаймистих рідин;

- Проведення вогневих, зварювальних та інших робіт без спеціального дозволу.

Проведення вогневих, зварювальних та інших робіт без спеціального дозволу;

- Увімкнення лабораторного або електрообладнання без дозволу викладача;

- Захаращення шляхів евакуації або аварійних виходів.

4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях

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

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

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

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

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

- Евакууйте людей та матеріальні цінності;

- Повідомте керівника та чергового (якщо такий є) про те, що сталася пожежа.
- За необхідності відключити колектор і вентиляційні системи;
- Приступити до гасіння пожежі за допомогою наявних первинних засобів пожежогасіння;
- Викликати пожежну команду для надання порад щодо гасіння пожежі та іншої допомоги.

4.2.5 Вимоги безпеки праці після завершення робіт

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

Відповідальний за пожежну безпеку на об'єкті після

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

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

Переконатися у відсутності порушень, які можуть призвести до пожежі;

- Відключити електроживлення електроприладів та обладнання.

(крім електроустановок.

виключаються).

Висновки.

Для покращення умов охорони праці слід врахувати наступні положення

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

- Забезпечення працівників необхідними засобами індивідуального захисту та спецодягом;

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

- Забезпечити працівників інструкціями з охорони праці відповідно до виду виконуваної роботи;
- не допускати виконання робіт несправними інструментами; і
- своєчасно проводити навчання та підвищення кваліфікації з питань охорони праці.

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГАЗУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\varphi = (W / W_6)100 = 41,6 \%$$

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

$$W_g / W = 2,4 \text{ рази}$$

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

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

Z_m – вартість палива, грн./ т;

B – річна економія палива, т;

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

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

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

I – сумарні експлуатаційні витрати, грн.

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

У такому разі економічний ефект слід визначити з виразу:

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

Обчислимо термін окупності використання ВДЕ за формулою:

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

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

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

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

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

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

Економія газу визначається за формулою:

$$B = Q_{річ} / Q_n^p \quad (5.11)$$

$$B = 21176 \text{ м}^3$$

де Q_n^p – нижча теплота згоряння природного газу 35 МДж / м³

Ми визначаємо капітальні витрати на установку і придбання обладнання, необхідного для її монтажу. Якщо вартість 1 кВт настановної потужності установки НПДЕ складає 1200 грн.

$$K = 0,416 \cdot W \cdot C_{в.п}$$

$$K = 0,416 \cdot 180 \cdot 1200 = 89,856 \text{ тис грн}$$

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

В даний час вартість 1000 м³ газу для виробничих і управлінських об'єктів становить 3918,57 грн. Враховуючи ці дані, визначте вартість запасеного природного газу за формулою:

$$E_{НПДЕ} = (B \cdot C_{газ}) / 1000 = 82978,156 \text{ грн}$$

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

$$T_{NPDE} = 89856 / 82978,156 = 1,08 \text{ рік}$$

Отримані результати розрахунків заносимо в таблицю додатку 1

Висновки

1. Були визначені економічні показники для економ-класу, який споживає 180 кВт*год кожен, що становить 41,6% від потужності виробленого біогазу, що в 1 раз перевищує потребу в електроенергії протягом 2,4 днів.

2. Якщо взяти до уваги ціну на природний газ, то вартість запасеного газу становить 82978,156 гривень, що є досить важливим показником для економіки.

3. Термін окупності використання NPDE, тобто установки для виробництва паливного газу, становить 1,08 року.

4. Таким чином, розрахунки підтвердили доцільність використання установки.

Висновки

1. В дипломній роботі виконано паливно-енергетичний аналіз з метою скорочення енергетичних ресурсів. Встановлено, що на частку біоенергетичних ресурсів припадає 27%, це є 78,2 млн. т у.п. на рік поновлюваних джерел енергії. В Україні в сільському господарстві виробляється значна кількість відходів з біомаси, яка може стати пріоритетним джерелом поновлюваних енергоресурсів.
2. При розгляді технологій переробки органічних відходів, незалежно від проведених досліджень та конструкторських розробок в цій області, процеси газифікації та анаеробного зброджування не отримали реалізації в промисловості, однак, виробництво палива, що базується на локальних ресурсах сировини, як правило, не велике і склад отриманого газу важко контролювати.
3. Таким чином, піроліз є ефективним методом термічної обробки рослинних відходів, а використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє невелика кількість забруднюючих речовин, що дозволяє отримувати високоякісне і екологічно чисте паливо практично з будь-якої сировини.
4. Проведені дослідження процесу піролізу з метою підвищення якості отриманого газу. Досягненням цього встановлено, що є необхідністю використовувати процес регенерації, тобто відбирати частини газу від загальної для збагачення одержуваного газу, при цьому підвищуючи теплотворну здатність.
5. Для підвищення якості газу необхідно контролювати вологість біомаси. Для цього було вмонтовано вологомір, що дозволило істотно підвищити ефективність роботи установки до 18,5 МДж/м³, а також збільшити вихід паливного газу до 85%.
6. Хроматографічним методом встановлено склад паливного газу, Досліджено, що процес виділення летючих речовин в протікає в області низьких температур 200- 500°C.

7. Вирішені задачі щодо оптимізації піролізної камери, де підтримується відповідний температурний режим, шляхом моделювання теплового та ексергетичного балансу. Визначили ККД установки 0,87, а ексергетичний ККД менше в 1,5 рази за тепловий. Відповідно це обумовлюється витратами при передачі тепла частинками матеріалу, очевидно, на стадії сушіння цього матеріалу і витрачається теплота. Тому необхідно врахувати вологість матеріалу, який потрапляє в камеру піролізу.
8. Обробку отриманих даних виконували методом планування експерименту. В результаті експериментів отримано теплоту згоряння деревної тирси та лущиння соняшника від 18 до 13 МДж/кг з вологістю матеріалу від 1 до 40% відповідно.
9. Охорона праці
10. Економічні показники визначали для господарства, якому потрібно 180 кВт год енергії, відповідно це складає 41,6 % від потужності виробленого паливного газу, що в свою чергу, в 2,4 рази більше ніж добова потреба в електроенергії. Що дає змогу зекономити газу в розмірі 82978,156 грн.
11. Таким чином, підтверджується доцільність використання паливного газу, тому що термін окупності установки з виробництва паливного газу складає 1,08 років.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ващенко В.І., Похиленко О.М. "Технології термічної переробки біомаси: піроліз, газифікація, спалювання" // Енергетика та екологія. – 2020. – №3. – С. 45–52.
2. Білоус С.В., Кравченко М.О. "Газифікація твердих побутових відходів: перспективи для України" // Відновлювана енергетика. – 2019. – №2. – С. 25–33.
3. Balat M., Kırtay E. "Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects" // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35, Issue 14. – P. 7416–7426.
4. Basu P. "Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory". – Elsevier, 2018. – 548 p.
5. Bridgwater A.V. "Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids" // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2012. – Vol. 51. – P. 3–22.
6. Demirbaş A. "Sustainable biofuels from biomass materials" // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2009. – Vol. 31, Issue 13. – P. 1200–1208.
7. Комаров В.В., Смирнов Д.М. "Піроліз деревини як ефективний метод отримання енергоресурсів" // Альтернативна енергетика і екологія. – 2021. – №6. – С. 12–20.
8. **Золотовська О.** Біомаса – енергоресурс сільського господарства // *Priority directions of science and technology development: Abstracts of the 3rd International scientific and practical conference* (Kyiv, Ukraine, 22–24 November 2020). Kyiv: SPC “Sci-conf.com.ua”, 2020. С. 318–321. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-priority-directions-of-science-and-technology-development-22-24-noyabrya-2020-goda-kiev-ukraina-arhiv/>.

9. García L., Salvador M.L., Arauzo J. "Influence of operating conditions on the devolatilization of wood and its relationship with char gasification kinetics" // *Fuel*. – 2013. – Vol. 82, Issue 11. – P. 1291–1301.
10. Іванов С.В., Коваленко О.М. "Перспективи впровадження піролізних установок у сільськогосподарських підприємствах" // *Економіка та енергетика агропромислового комплексу*. – 2020. – №4. – С. 33–39.
11. Meier D., Faix O. "State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials" // *Biomass and Bioenergy*. – 2013. – Vol. 20, Issue 3. – P. 131–145.
12. Петренко О.О., Сидоренко Л.В. "Технологічні аспекти газифікації біомаси в умовах енергодефіциту" // *Технічна енергетика*. – 2021. – №2. – С. 41–47.
13. Qian J., Zhou Y., Zhang J. "Development and application of biomass pyrolysis technologies in China" // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 12, Issue 5. – P. 70–90.
14. Харитонов М.М., Бабенко М.Г., Мартинова Н.В. та ін. Комплексна екологічна оцінка створення енергетичних плантацій на рекультивованих землях: монографія. Дніпро: Ліра, 2021. 192 с.
15. Шидловський А.К., Стогній Б.С. Паливно-енергетичний комплекс України в контексті глобальних енергетичних перетворень // *Українські енциклопедичні знання*. Київ, 2014. 468 с.
16. Тарасенко Л.П., Ковальчук А.М. "Хімічний склад і енергетична цінність рослинної біомаси" // *Агроекологія та природокористування*. – 2019. – №2. – С. 33–41.
17. McKendry P. "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass" // *Bioresource Technology*. – 2002. – Vol. 83, Issue 1. – P. 37–46.
18. Basu P. "Biomass characteristics" // *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction*. – Elsevier, 2018. – P. 41–62.
19. Bridgwater A.V. "The technical and economic feasibility of biomass conversion to energy" // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 15, Issue 5. – P. 2125–2156.

20. Кириленко В.І., Савченко О.М. "Роль фізико-хімічних властивостей рослинної біомаси у виробництві енергії" // Енергетика та навколишнє середовище. – 2021. – №4. – С. 19–27.
21. Raveendran K., Ganesh A., Khilar K.C. "Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components" // Fuel. – 1996. – Vol. 75, Issue 8. – P. 987–998.
22. Іванов О.О., Коваленко Н.В. "Енергетичний потенціал і склад рослинної біомаси: екологічний аспект" // Наукові праці аграрних університетів. – 2020. – №7. – С. 41–49.
23. Sluiter A., Hames B., Ruiz R. "Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass" // Laboratory Analytical Procedure (LAP). – NREL, 2012.
24. Ткаченко Ю.В., Бойко С.М. "Дослідження фізико-механічних властивостей біомаси для потреб біоенергетики" // Агробіоенергетика. – 2019. – №1. – С. 50–57.
25. Van Soest P.J. "Nutritional ecology of the ruminant: The composition of forages and their chemistries" – Cornell University Press, 2018.
26. Воронович О.В., Лисенко Т.М. "Біомаса: сировина для енергетичних технологій" // Технічні науки: сучасні досягнення. – 2020. – №8. – С. 12–20

Техніко-економічні показники ефективності використання установки
виробництва паливного газу.

Показники	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Кількість отриманого газу	V	м ³ /добу	96
Витрата біогазу для підвищення теплої здатності	0,1 V	м ³ /добу	9,6
Енергетична цінність отриманого газу	Q _{оп}	МДж/м ³	1555,2
Середньодобове споживання електроенергії	W	кВт·год/добу	180
Процентна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	φ	%	41,6
Кількісна частка середньодобового споживання енергії від виробленого газу	W _б / W	раз	2,4
Річне виробництво теплової енергії установкою	Q _{річ}	МВт год	0,2
Тривалість споживання палива, дні (тривалість можна порівняти наприклад до опалювального сезону)	T _{оп}	днів	205
Капіталовкладення	K	грн	89856
Економія природного газу	B	м ³	21176
Ціна 1000 м ³	Ц _{пт}	грн	3918,57
Вартість зекономленого газу	E _{нпде}	грн	82978,156
Термін окупності	T _{нпде}	роки	1,08

