

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і СГМ

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 ефективності паливної установки»

Виконав: студент 2 курсу, групи МГМ-1-20
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Марков Сергій Олександрович

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Рецензент: _____

Дніпро 2021

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і СГМ
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**

Марков Сергій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи :** Обґрунтування ефективності паливної установки

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

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“17” 11 2021 року № 3539

2. Строк подання студентом роботи 30.11.2021р

3. Вихідні дані до роботи Огляд особливостей біомаси рослинного походження та існуючих технологій виробництва паливного газу з біомаси, огляд літературних джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1 Особливості біомаси рослинного походження. 2 теоретичне обґрунтування підвищення калорійності газу. 3 Обґрунтування експериментальних досліджень. Результати досліджень 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність використання паливного газу. Висновок. Бібліографічний список.

5 Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (2 аркуші, А4).
2. Огляд і аналіз технологій (2 аркуші, А4).
3. Теоретичні дослідження (2 аркуші, А4).
4. Експериментальні дослідження (5 аркушів 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	Кравець В.В., доцент		
5	Вініченко І.І., доцент		
Нормо-контроль	Пономаренко Н.О., доцент		

7. Дата видачі завдання 29.04.2021

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Особливості біомаси рослинного походження	до 31.05.21 р	
2.	Виконання теоретичних досліджень	до 30.06.21 р	
3	Виконання експериментальних досліджень	до 4.09.21 р.	
4	Охорона праці	до 04.11.21 р.	
5	Економічна частина	до 10.11.21 р.	
6.	Демонстраційний матеріал	до 13.11.21 р.	

Студент

_____ (підпис)

Марков С.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотовська О.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Марков С.О. Обґрунтування ефективності паливної установки/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2021.

В дипломній роботі проаналізовано види біомаси з метою скорочення використання традиційних видів палива. Визначені перспективи застосування запропонованої технології. Виконано порівняльний аналіз існуючих технологій переробки відходів біомаси: пряме спалювання, газифікації і піролізу з точки зору одержання висококалорійного паливного газу. Доведено, що при використанні сільськогосподарських відходів біомаси (лушпиння соняшника, відходи деревини) технологія повільного низькотемпературного піролізу є найбільш ефективна, тому що вимагає найменших енергетичних витрат, а теплота згоряння паливного газу вища за теплоту згоряння багатьох вторинних паливних газів. Виконані дослідження складу паливного газу, вологості, значення теплоти згоряння палива.

Наведено результати розрахунків економічної ефективності використання паливного газу з відходів сільськогосподарських культур.

Ключові слова: біомаса, паливний газ, піроліз, теплота згоряння, технологія виробництва

Публікація статті в збірнику «MATERIÁLY IN THE FRAME OF EDUCATIONAL PROJECT “ECOMINING: DEVELOPMENT OF INTEGRATED PHDPROGRAM FOR SUSTAINABLE MINING & ENVIRONMENTAL ACTIVITIES» 06 – 10.09.2021 & WORKSHOP INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN MINING AND RECLAMATION», Praha Publishing House «Education and Science»

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ВСТУП	7
1 ОСОБЛИВОСТІ БІОМАСИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ	10
1.1 Класифікація біомаси як палива	12
1.2 Енергетичний потенціал культур рослинного походження	15
1.3 Аналіз калорійності та складу газу з біомаси	17
1.4 Класифікація технологій використання біомаси в якості джерела енергії	18
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ КАЛОРІЙНОСТІ ГАЗУ	26
2.1 Обґрунтування принципу роботи класичного піролізного апарату	26
2.1.1 Аналіз впливу вологи паливного матеріалу на його калорійність	28
2.1.2 Аналіз температури спалаху горючих газів	29
2.2 Аналіз підвищення ефективності використання паливного газу	30
2.2.1 Моделювання матеріального балансу складових паливного газу	31
2.2.2 Моделювання теплового балансу	35
2.3 Моделювання сумарного виходу продуктів термічного розкладання	42
3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	46
3.1 Розробка експериментального стенду	46
3.2 Визначення вологості дослідних зразків	49
3.3 Визначення якості паливного газу	52
3.3.1 Визначення кількісного складу паливного газу	53
3.3.2 Методика визначення хроматографічних параметрів	54
3.4 Аналіз результатів експериментів характеристик дослідного газу.	63
3.4.1 Аналіз результатів експериментів теплоти згоряння дослідного газу	66
3.4.2 Аналіз результатів експериментів впливу параметрів на склад газу	68
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	73
4.1 Організація охорони праці на підприємстві	73
4.2. Вимоги безпеки праці при роботі з газовими установками для опалення приміщень.	74

	6
4.2.1. Загальні положення	74
4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком роботи	75
4.2.3 Вимоги безпеки праці в процесі виконання роботи	75
4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях.	76
4.2.5 Вимоги безпеки праці по закінченню робіт	77
5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗУ	78
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85
ДОДАТКИ	

Вступ

Актуальність теми. Безперевне зростання цін на альтернативне паливо внаслідок енергетичної кризи стимулює проведення досліджень новітніх, або давно забутих джерел енергії. Таким джерелом являється біомаса, в склад якої входить органічний вуглець, тобто рослинний матеріал: деревина, щепка, тирса, лушпиння зернових культур та інш. Отже, відомо, що паливо отримане з маси рослинного походження незадовільнить енергетичні потреби в промисловості, але використання в невеликих господарствах для заміни традиційного палива цілком заслуговує уваги.

Якщо розглядати проекти паливних установок особливе значення утилізації біомаси має сільське господарство, якщо на технологічні потреби витрачається велика кількість палива. Тому стає питання щодо визначення технології її використання. Існує декілька способів виробництва паливного газу, один з них, це піроліз рослинної біомаси для подальшого спалювання газу в котельних агрегатах, когенераційному обладнанні, в двигунах внутрішнього згорання. Фактори, які вирішують стосовно який спосіб переробки вибрати залежить, звичайно, початкових витрат, експлуатаційних витрат, надійності використання, ефективність використання одержуваної продукції.

Отже, технології з виробництва паливного газу спрямовані для одного продукту, але підвищення калорійності газу при цьому не досліджувалось. Тому, в процесі виробництва газу, важливим завданням являється підвищення його енергетичних характеристик. Дослідження умов та режимів отримання рослинного газу з підвищенням його калорійності, тобто теплоти згорання являється актуальною задачею, вирішення якої здійснить теплоенергетичну ефективність використання самих ресурсів відходів сільськогосподарських культур.

Мета і завдання дослідження полягають в удосконаленні процесу перетворення біомаси рослинного походження в паливний газ з урахуванням його теплоенергетичної здатності та екологічності існуючої рослинної бази.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої мети та завдання в роботі були вирішені наступні питання:

- виконаний аналіз енергетичного використання біомаси з метою скорочення дефіциту традиційних власних паливно-енергетичних ресурсів;
- виконаний аналіз та уточнення методу визначення обсягів різних видів рослинних відходів сільськогосподарських культур;
- удосконалення технології в експериментальній установці для дослідження процесів термічного розкладання часинок біомаси з метою збагачення паливного газу
- визначено методіку моделювання ефективності виробництва газу з підтвердженням прийнятих рішень удосконалення дослідної установки;
- обґрунтування експериментальних та розрахункових залежностей для визначення складових енергетичних балансів процесу в якості оцінки теплоенергетичної ефективності;
- дослідження та обґрунтування основних теплофізичних умов (температури, тиск, вологість, витратні характеристики)
- визначення економічної ефективності використання установки з виробництва паливного газу.

Об'єктом дослідження є технологія виробництва паливного газу.

Предметом дослідження є режимно-технологічні параметри процесу термічного розкладання біомаси. Вплив на склад газу, а саме летючих компонентів, та властивості цих продуктів.

Методи дослідження. Досягнення поставленої в роботі мети було реалізовано використанням теоретичних досліджень, які виконані на базі методів, термічних процесів в енергозберігаючих технологіях з метою оцінки теплотехнічної ефективності використання нетрадиційних джерел енергії. Експериментальні дослідження виконані за спеціально розробленими методиками з урахуванням розрахунково-аналітичних способів досліджень для визначення енергетичної ефективності процесу термічного розкладання біомаси відповідно до законів збереження маси та енергії.

Практичне значення отриманих результатів.

Апробація результатів досліджень:

Участь в конференції та публікація статті в збірнику «MATERIÁLY IN THE FRAME OF EDUCATIONAL PROJECT “ECOMINING: DEVELOPMENT OF INTEGRATED PHDPROGRAM FOR SUSTAINABLE MINING & ENVIRONMENTAL ACTIVITIES» 06 – 10.09.2021 & WORKSHOP INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN MINING AND RECLAMATION», Praha Publishing House «Education and Science» (Додаток 1)

Структура і обсяг дипломної роботи. Магістерську роботу викладено на _____ з яких _____ основного тексту.

Робота складається з вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел _____ назв, містить _____ рисунків, _____ таблиць, додатків на _____ листах.

1 ОСОБЛИВОСТІ БІОМАСИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Прогнозування енергетичного потенціалу відходів сільськогосподарських культур, слід зазначити, що джерелом тепла може бути органічна частина відходів. Тому важливу роль відіграє і екологічність отриманого газу. В роботі О.В. Золотовської [1] представлено: «Забезпечити становище, при якому екологічні оцінки ретельно досліджувались в енергетичній політиці. Очевидно, що є необхідністю розширення співпраці урядовими установами, які пов'язані з енергетикою, екологією, соціальними проблемами та макроекономікою. Формування таких робочих груп дає можливість сумісної розробки ефективної стратегії щодо модернізації та покращенню ефективності виробництва енергії. Спростити процес зниження викидів, що є найбільш ефективним, наприклад, в зоні підвищеної енергетичної ефективності, в роботі системи централізованого опалення, в області використання шахтного метану та поновлювальних джерел енергії. В проектах по збільшенню ефективності виробництва і споживання теплової і електричної енергії, найбільший інтерес викликають технології, які мінімізують викиди парникових газів» (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 - Рівень зниження емісії парникових газів для різних енергетичних технологій [1].

Слід зазначити, дослідження О.В. Золотовської [1]: «Отже, виходить що біомаса явно відрізняється на фоні відновлювальних джерел енергії, тому що частка зниження емісії парникових газів приблизно становить 55 %. Використання біомаси в якості палива одна з реальних альтернатив зниження

парникового ефекту, тому що рослинні відходи є нейтральними по відношенню CO_2 в атмосферному середовищі. Тобто при їх згорянні виділяється така ж кількість, яка була поглинута в процесі росту самої рослини» (рис.1.2).

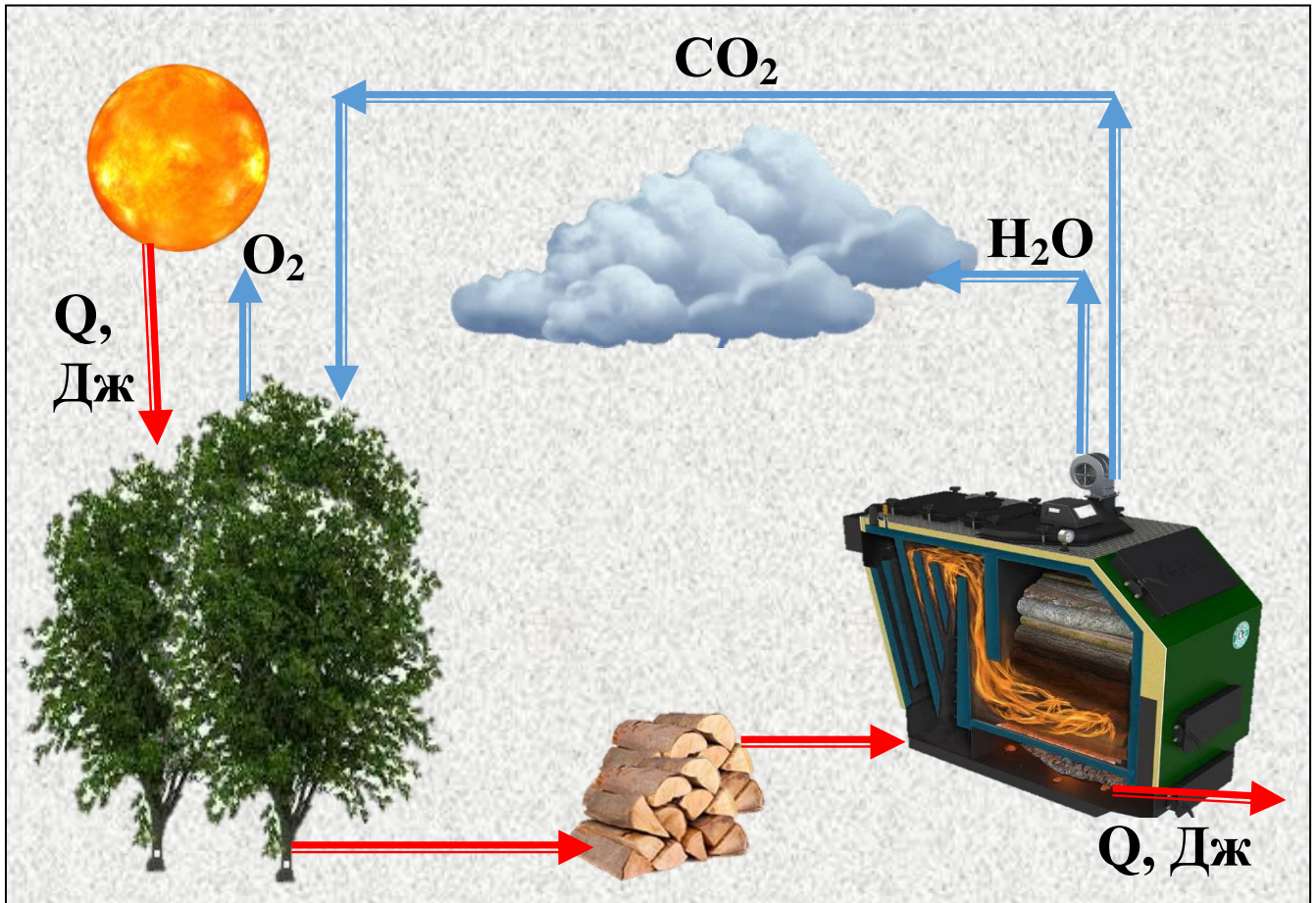


Рисунок 1.2 - Схема екологічності використання біомаси

Дослідження О.В. Золотовської, які приведені в монографії з вченим М.М. Харитоновим показують: «Великий попит на енергетичне використання біомаси пов'язаний не тільки з економічними передумовами, але й з бажанням знизити викиди парникових газів під час спалювання викопного палива. Водночас, утилізація відходів біомаси є не менш актуальним екологічним завданням. Використання біомаси як палива – одна з небагатьох реальних альтернатив зниження парникового ефекту, оскільки рослинні відходи є нейтральними відносно до балансу CO_2 в атмосфері. Використання ж нафти, вугілля і газу для отримання енергії призводить до збільшення концентрації CO_2 в атмосфері, оскільки при цьому спалюється вуглець, який накопичується в цих енергоносіях протягом багатьох років. Слід зазначити, що метан

вважається другим після вуглекислого газу за ступенем впливу на глобальне потепління. Концентрація метану в атмосфері щорічно зростає на 0,5 %, вуглекислого газу – на 0,4 % і оксиду азоту – на 0,25 % » [2].

Таблиця 1.1 – Основні характерні показники парникових газів [2]

	Основне джерело	Відсоток концентрації в атмосфері	Щорічний приріст, %	Приріст в атмосфері	Ефективний час перебування в атмосфері
Двоокис вуглецю	Виробництво енергії, зведення лісів, спалювання біомаси	360	0,4	біля 7,1 млрд.т/г	50-200 років
Метан	Виробництво природного газу та його транспортування; процес травлення(напр. у худоби); рисівник; виділення сміттєвих газів; зведення лісів	1,7	0,5	37 млн.т/г	12,5 років
Оксид азоту	В основному від використання добрив і спалювання викопного палива в двигунах внутрішнього згорання	315	0,25	3-8 млн. т/г	120 років

1.1 Класифікація біомаси як палива

Аргументуємо згідно цих же авторів [1,2]: «Біомаса може бути використана як тверде паливо або перероблена в рідкий чи газоподібний стан. Як тверде паливо можуть бути використані шматкові відходи переробки деревини. Однак вивозити великі шматкові відходи за межі підприємства, навіть на невеликі відстані, не вигідно у зв'язку з великою складністю складських і вантажно-розвантажувальних робіт. Тому доцільно переробляти

шматкові відходи в тріску на місці і направляти цю щепу на відповідні спеціалізовані підприємства для використання як вихідної сировини. Шматкові відходи слід переробляти в тріску задля використання їх не тільки як технологічної сировини, але і як заводського палива (за використання традиційних котлів). Найбільш ефективно та інтенсивно згорають відходи, що мають розмір від 25 до 100 мм (тріска). Залежно від цільового призначення і висунутих вимог, розрізняють тріску технологічну і паливну. Основним обладнанням під час виготовлення технологічної тріски є рубільні машини.

Брикетування сипучої деревини виконують шляхом пресування зеднальними речовинами або без них. Більш широко застосовується брикетування без сполучних речовин. Сипуча деревина, яка займає значний простір, після брикетування зменшується в об'ємі в кілька разів, стає транспортабельною і зручною в обігу. Брикетування сипучих відходів збільшує теплотворну здатність тирси та стружки. Брикети застосовуються як заводське паливо і для постачання місцевому населенню. Брикетування тирси збільшує продуктивність варильних котлів в гідролізному виробництві під час завантаження цих котлів не сосною тирсою, а тирсовими брикетами. Для брикетування тріски потрібні більш потужні преси, ніж для брикетування тирси. Практично брикетуванню піддається тільки тирса. Вологість тирси перед брикетуванням повинна бути не вище ніж 12–15 % і не нижче 8–9 %.

Гранулювання деревних відходів – це отримання паливних гранул з будь-яких деревних відходів, що утворюються в процесі механічної переробки деревини. До переваг цього способу обробки можна віднести раціональне використання деревних відходів, отримання висококалорійного екологічно чистого палива, підвищення ККД, можливість введення системи механізації й автоматизації топкових пристроїв завдяки використанню гранул, підвищення стійкості процесів горіння. Технологія гранулювання деревних відходів включає: збір відходів, подрібнення, сушіння та безпосередньо гранулювання. Сутність гранулювання полягає в послідовній обробці сухої дрібнодисперсної сипучої сировини вологою, температурою і тиском. Як основне обладнання для гранулювання можуть бути використані сільськогосподарські гранулятори.

У нетрадиційній енергетиці особливе місце посідає переробка біомаси метановим бродінням з отриманням біогазу, що містить близько 70 % метану, і стерильних органічних добрив. Надзвичайно важлива утилізація біомаси в сільському господарстві, де на різні технологічні потреби витрачається велика кількість палива і безперервно зростає потреба у високоякісних добривах. Біогаз – це суміш метану і вуглекислого газу, що утворюється в процесі анаеробного зброджування спеціальних реакторів-метантенках, влаштованих і керованих таким чином, щоб забезпечити максимальне виділення метану. Енергія, що отримується під час спалювання біогазу, може досягати 60–90 % від тієї, якою володіє вихідний матеріал [3,4].

Інше, і дуже важливе: гідність процесу переробки біомаси полягає в тому, що в його відходах міститься значно менше хвороботворних мікроорганізмів, ніж у вихідному матеріалі. Отримання біогазу економічно виправдане і є кращим при переробці постійного потоку відходів (стоки тваринницьких ферм, боєнь, рослинних відходів тощо). Економічність полягає в тому, що немає потреби в попередньому зборі відходів, в організації та управлінні їхнього подачею; при цьому відомо, скільки і коли буде отримано відходів. Отримання біогазу можливе в установках різних масштабів, особливо ефективно на агропромислових комплексах, де існує можливість реалізації повного безвідходного циклу.

До рідких видів палива, вироблених із біомаси, відносять: біопаливо (біоетанол, біодизель) або смоли, піропаливо, масла.

Паливний етанол – це високооктановий, кисневмісний компонент палива, який отримують під час ферментації цукру. Цукор зазвичай отримують з цукрових культур, шляхом гідролізу зернового крохмалю або через гідроліз лігноцелюлозних матеріалів, таких, як солома, трава і деревина. Основний процес включає ферментний гідроліз крохмалю і цукру, які містяться в зерні, і ферментацію цукру в етанол за допомогою дріжджів. Слабкий розчин етанолу дистилується і зневоднюється для отримання безводного етанолу, який підходить для перемішування з бензином в автомобілях.

Біодизельне паливо – це вид палива, який отримують шляхом перетерифікації рослинного масла і який може змішуватися або використовуватися як заміник дизельного палива у двигунах. Одним з основних видів сировини для отримання біодизелю є ріпак, у якому міститься багато жирів, котрі забезпечують високу теплоту згоряння. За прогнозами виробництва, рапсова олія займає четверте місце у світі (9,7 %) після соєвої (29,7 %), пальмової (13,1 %) і соняшникової (12,3 %). Існує кілька способів використання ріпаку для виробництва біодизельного палива. З наведених даних виходить, що використання відходів сільськогосподарських підприємств як сировини для виробництва палива має велику економічну привабливість. Для вирощування сировинних технічних культур необхідні великі площі землі, додаткове обладнання для переробки в рідке паливо, високі витрати енергії на його виробництво, які співвідносні з енергетичним потенціалом одержуваного продукту. З екологічної сторони це може сприяти пом'якшенню проблеми зміни клімату, зменшенню кількості кислотних дощів, ерозії ґрунту, забруднення водойм, забезпеченню середовища для існування диких видів тварин, а також допомогти підтримувати здорові умови існування лісів за допомогою кращого менеджменту. Отже, основну увагу необхідно приділити розробкам технологій виробництва висококалорійного паливного газу з відходів підприємств із переробки біомаси». Використання поновлювальних джерел енергії з існуючої ресурсною базою є доцільним для створення нових технологій, які будуть сприяти екологічним та економічним умовам.

1.2 Енергетичний потенціал культур рослинного походження

Властивості біомаси суттєво впливають на конструкцію топкового пристрою, де відбувається спалювання. Крім того, визначається ефективність роботи котлів, енергетичних установок, які працюють на паливі рослинного походження [3-5].

Основною витратою тепла в будь-якому котлоагрегаті є витрата теплової енергії з відпрацьованими газами. Величина цієї витрати визначається

температурою відпрацьованих газів, температури спалаху газу, теплотворну здатність і т.п.



Рисунок 1.3 - Енергетичний потенціал рослинної біомаси України

Фактори які визначають ефективність процесу спалювання біомаси наступні: вологість, елементарний склад, щільність, зольність, однорідність дисперсного матеріалу по складу та розмірам, відповідність конструкції топки використовуваному виду палива.

Відходи рослинного походження можуть використовуватись у якості твердого, рідинного та газоподібного палива. Енергетичний потенціал розвитку для отримання палив, основною складовою, якого є біомаса: відходи злакових

кукурудзи 40,1 млн. т, лузга соняшника – 21 млн.т, солома – 34,3 млн.т, лузга гречки, рису – 6,9 млн. т, енергетичні культури - верба, тополь, рапс, міскантус і т.д.) – 11,5 млрд. м³, щепи, деревинна тирса, шкорлупа горіхів – 6,1 млн. т (рис. 1.3) [7,12]

1.3 Аналіз калорійності та складу газу з біомаси

Для вибору оптимального режиму отримання паливно газу необхідно оцінити склад паливної суміші з біомаси та калорійність отриманого газу, яка в першу чергу залежить від елементного складу біомаси рослинного походження. Деревинні та рослинні породи розрізняються між собою по елементному складу незначно, в середньому, мають 50% вуглецю, 43 % кисню та 6% водню (табл. 1.2) [3-7]

Таблиця 1.2 - Елементарний склад різних видів біомаси

Біомаса	С	Н	О	N	S	A	Q _н ^p , кДж/кг
Енергетичні культури	50,73	6,1	43,36	0,57	0,01	1,05	20,1
Солома	51,23	5,99	43,1	0,59	0,01	1,02	19,8
Щепа, деревина, шкорлупа горіха, лузга соняшника	50,91	5,83	43,06	0,21	0,02	1,59	19,53
Злакові, кукурудза	48,9	6,15	42,98	0,45	0,01	1,55	19,78
Лузга гречки, рису	49,1	6,15	42,81	0,45	0,01	1,22	19,5

Останню частину сировини 0,1-0,3% складає азот та неорганічні сполуки, які складають золу. Кількість золи в різних породах деревини та інших рослинах залежить від умов вирощування. Якщо газ отримують при низьких температурах 200-400 °С, тоді утворюється 60 % від загального складу газу СО та СО₂ приблизно в різних частках. Наявність цих газів знижує калорійність паливного газу. Наприклад, для метану СН₄ характерні температури 300-520 °С, в зоні високих температур його частка зменшується. Тому є доцільним проаналізувати різні види біомаси на їх склад. Також слід зазначити, що на калорійність газу впливає вологість самої біомаси (табл. 1.3) [12].

Таблиця 1.3 - Теплота згоряння в залежності від вологості

Вологість біомаси, %	Теплота згорання	
	ккал/кг	МВт/год/т
25	3199	3,72
30	2944	3,4
35	2694	3,13
40	2444	2,83
50	1938	2,25

Теплотворна здатність біомаси прямопропорційна складу вологості. Як показує досвід, теплотворна здатність зменшується на 1.5 % при збільшенні вологості на 1%. Важливо, щоб біомаса для отримання газу була більш сухою. Таким чином, оптимальний рівень вологості повинен бути приблизно до 22%.

1.4 Класифікація технологій використання біомаси в якості джерела енергії

З наукових досліджень [2]: «Термохімічна газифікація являє собою процес часткового окислення біосировини, що містить вугілля, з отриманням газоподібного енергоносія – генераторного газу. Отриманий газ складається з монооксиду вуглецю; водню; метану; діоксиду вуглецю; невеликої кількості вуглеводневих сполук більш високого порядку, таких, як метан і етан, містить пари води; азоту (за повітряного дуття); різних домішок смоли і золи. В ролі окислювача під час газифікації можуть використовуватися повітря, кисень, пар або суміші цих речовин. Максимальна температура становить 800–1300°C. Низькокалорійний газ це генераторний газ, який виробляється під час повітряної газифікації з вищої теплотою згорання 4–6 МДж/кг. Цей газ можна спалювати в котлах, після очищення – в газових двигунах або турбінах, але він не придатний для транспортування по трубопроводу через низьку енергетичну щільність. Середньокалорійний газ – це газ, який виробляється під час газифікації з використанням кисню (10–12 МДж/кг). Він придатний для обмеженого транспортування по трубопроводу і для використання в ролі синтез-газу з метою отримання метанолу і газоліну. Шляхом парової газифікації може бути отриманий середньокалорійний газ з теплотою згорання

5–12 МДж/мі, це двостадійний процес, який реалізується в двох реакторах киплячого шару. Найбільш широко в наш час застосовується повітряна газифікація. При цьому виключаються всі витрати і труднощі, пов'язані з виробництвом і використанням кисню, а також із необхідністю двох реакторів під час парової газифікації [7-10].»

Тому що до фракційного складу існують досить високі вимоги через вміст золи, приблизно двадцять відсотків в одержаному газі. Тому цей газ потребує значного очищення або розташування установки біля газового генератора. Отже, горіння генераторному газу, одержаного з рослинних відходів, зменшує вміст смол в продуктах згоряння і відповідно впливає на екологічну діяльність.

У таблиці 1.4 наведено звичайний склад газу, одержаного способом газифікації .

Таблиця 1.4 - Склад газу отриманий способом газифікації

Сировина	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂
Деревинна щепка	28	17,8	4	11,4
Лісові відходи	21	15	2.3	9
Порубана солома	17,6	18,1	3,1	14,05

Однак, були проведені багато досліджень різними вченими, закордонними також, процес газифікації не знайшов широкої реалізації в промисловому господарстві.

Розглянемо в роботі [2]: «Анаеробна переробка й еталонна ферментація належать до біологічного методу переробки біомаси. В процесі анаеробної переробки або перегнивання (методом ферментації) органічні речовини розкладаються до CO₂ і CH₄. Процес анаеробної переробки органічних відходів відбувається за відсутності кисню, за участю різних груп бактерій (ацетонобутанальна ферментація), в результаті якої під дією мікроорганізмів утворюється оцтова кислота, масляна кислота, етанол, бутанол, ізопропанол, а також діоксид вуглецю і водень. Однак при цьому відбуваються технологічні процеси, що вимагають застосування концентрованих кислот для прискорення гідролізу. У зв'язку з цим виникає необхідність у використанні додаткових

спеціальних конструкційних матеріалів. Також вартість отримання продукту ферментації нині час ще дуже висока, а розроблені на їх основі процеси малопродуктивні. Зброджування відходів являє собою процес розкладання органічних речовин з утворенням метану і вуглекислого газу в результаті життєдіяльності складного комплексу мікроорганізмів в анаеробних умовах. На першому етапі процесу відбувається розкладання високомолекулярних сполук (вуглеводів, жирів, білкових речовин) на низькомолекулярні органічні сполуки. На другому етапі за участю кислотоутворювальних бактерій відбувається їх розпад з утворенням органічних кислот і їх солей, а також спиртів вуглекислого газу (CO_2), водню (H_2), сірководню (H_2S) і аміаку (NH_3). Остаточне бактеріальнеперетворення органічних речовин у два основних компоненти (вуглекислий газ і метан) здійснюється на третьому етапі. Основний вплив на цей процес, що відбувається в спеціальних біологічних реакторах (метантенках), надають такі умови. Перша – відсутність кисню, тому що для своєї життєдіяльності метаноутворювальні бактерії потребують абсолютно анаеробного середовища. Друга умова – підтримка певної температури. Біологічний процес найкращим чином протікає в температурному інтервалі 30–37°C. Гарні результати виходять також за реалізації так званого термофільного процесу, що протікає за 55–60°C (Матвеев, 2004). Третя умова – підтримка заданої величини рН в діапазоні 6,5–8,5. Четверте – збереження певних співвідношення газів у сировині. Наприклад, оптимальне співвідношення вуглецю та азоту (C/N) має бути в межах 16/19. При цьому, крім вуглецево-азотного балансу, для здійснення сталого та ефективного процесу анаеробного зброджування сировини в ньому необхідна наявність мікроелементів, таких, як залізо, молібден, нікель, кобальт і селен. Кінцевими продуктами анаеробного зброджування є 60–70 % метану в біогазі, 30–40 % діоксиду вуглецю, 0–3 % сірководню, домішки водню, аміаку оксидів азоту. Кількість біогазу, що може бути виділена з різних сільськогосподарських відходів, залишків і сумішей за оптимальних умов анаеробної переробки, залежить від кількості субстрату, умов протікання процесу, бактеріального складу в реакторі тощо. В Україні навіть невеликі фермерські господарства можуть впроваджувати прості й

досить ефективні системи анаеробного збродження. Але найбільш рентабельними є великі біогазові установки (з об'ємом метантенка не менше ніж 800 м³). Такі системи можуть бути побудовані в нашій країні на фермах великої рогатої худоби з поголів'ям від 600 голів, на свинофермах від 6000 голів, на птахофермах з поголів'ям від 200 тис. голів, на цукрових, молочних, спиртозаводах та інших підприємствах харчової промисловості. Саме на великих біогазових установках можна організувати механізацію та автоматизацію процесу, а значить, оптимізувати його параметри і забезпечити цілодобову стабільну подачу біогазу в когенераційну установку, що виробляє електричну і теплову енергію. Вартість імпортного обладнання, необхідного для будівництва систем анаеробного збродження, для наших споживачів висока. Але за повної або часткової комплектації установок вітчизняним обладнанням ціна їх може бути значно зменшена і, відповідно, скорочується термін окупності. За допомогою технологій анаеробного збродження сільськогосподарських і органічних побутових відходів можна отримати біогаз з високим вмістом метану. Однак його виробництво, що базується на локальних ресурсах сировини, як правило, не велике. Крім того, анаеробне збродження є періодичним процесом, і склад одержуваного газу важко контролювати».

Продовження цитування цих же авторів, розглянемо третій спосіб переробки біомаси: «Пряме спалювання є одним із застосовуваних методів переробки біомаси, таких, як деревина і деревні відходи, солома, міські тверді відходи, сухий гній тощо. Основними хімічними елементами, що входять до складу деревної тріски, є % (мас) по сухій речовині: вуглець – 50, кисень – близько 40, водень – 5,7. Концентрація азоту становить менше ніж 1 %, хлору і сірки – менше 0,1 %, зольність – близько 1 %. Теплота згоряння за вологості 40 % відповідає 10,5 МДж/кг (Гелетуха и Железная, 2007, 2008). Деревну біомасу як паливо поділяють на кілька груп відповідно до її походження: спеціально заготовлена в лісі паливна деревина, відходи лісозаготівель, відходи деревопереробки тощо. Деревна тріска може бути отримана з ділової деревини, з дерев, зрубаних під час проріджування молодих насаджень, з відходів лісозаготівлі (сучкі, гілки). До групи відходів деревообробки входять деревні

відходи, що утворюються під час промислової обробки деревини (кора, тирса, стружка тощо). Для отримання деревного палива останнім часом починають використовуватися також спеціально вирощувані швидкозростаючі рослини (верба, тополя, павловнія). Зміст вологи в деревині і деревній корі коливається в широких межах – від 2 до 75 % (Жовтомир и Недовесов, 2002). Це пояснюється не тільки наявністю води в структурі біомаси, а й впливом пори року, місця зростання, а також способів зберігання і транспортування деревини. З підвищенням вологості знижується нижча теплота згоряння. До технологій спалювання деревної біомаси належать: спалювання у вихровій (циклонній) топці; спалювання розпорошеної сировини в пальнику; спалювання на решітці; спалювання пилоподібного деревного палива; спалювання в газогенераторній топці; спалювання в киплячому шарі; спалювання в циркулювальному шарі (Гелетуха и Железная)» [2].

«Використання соломи для прямого спалювання є одним із способів зниження викидів CO₂ в атмосферу. Солома, як і біомаса в цілому, є CO₂-нейтральним паливом, тобто споживання вуглекислого газу з атмосфери в процесі росту злакових культур відповідає емісії CO₂ в атмосферу при спалюванні соломи. З огляду на додаткові викиди вуглекислого газу, які відбуваються при зборі, транспортуванні та підготовці соломи для спалювання, зниження емісії CO₂ за умов заміни вугілля, що спалюється в котлі, на солому становить близько 90 %. Однак соломі важко застосовувати у вигляді палива як на етапах збору, транспортування і зберігання, так і на етапі безпосереднього спалювання. Це пов'язано з неоднорідністю продукту, відносно високою вологістю, малим об'ємним енерговмістом, досить низькою температурою плавлення золи і підвищеним вмістом хлору, обсягу соломи і вугілля. Рівні за енерговмістом розрізняються приблизно в 10–20 разів.

Поряд з прямим спалюванням і газифікацією, піроліз є ефективним методом термохімічної переробки рослинної біомаси, промислових і побутових відходів і одночасно однією з найменш розвинених в Україні технологій енергетичного використання біомаси (Белосельский и Хмелевская, 2004). Ця технологія дозволяє отримувати якісне, екологічно безпечне тверде, рідке і

газоподібне паливо з практично будь-якої сировини (включаючи полімери штучного походження), що містить органічні компоненти, оскільки використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє мала кількість забруднювачів» [2].

«У процесі піролізу з твердої біомаси виділяється газоподібна фаза і може бути отримано газоподібне, рідке і тверде паливо, які можуть ефективно застосовуватися для отримання тепла, електроенергії і з іншими цілями. Рідкі продукти піролізу мають теплоту згорання 20–25 МДж/кг і складаються зі складної суміші високоокиснених вуглеводнів із вмістом води до 20 % (мас.). Необроблене піропаливо є густою чорною смолянистою рідиною, вихід якої може досягати до 80 % маси сухої сировини (за швидкого низькотемпературного піролізу). Твердими продуктами піролізу є вуглиста речовина з теплотою згорання 30 МДж/кг, вихід якої досягає 30–35 % маси сухої сировини за карбонізації та повільного піролізу. Газоподібні продукти піролізу це зазвичай середньокалорійний газ з теплотою згорання 15–22 МДж/м³, а за умов часткової газифікації низькокалорійний газ $Q=4-8$ МДж/м³. Вихід газоподібного палива може доходити до 70 % маси сухої сировини за умов високотемпературного швидкого піролізу. Склад газу залежить від сировини і параметрів процесу. Теплотворна здатність підвищується, якщо використовувати гарячий газ. Такий газ зазвичай застосовується в самому процесі піролізу для підтримки температури процесу і сушки вихідної сировини». [2]

Таблиця 1.5 - Склад газу отриманого способом піролізу [2]

Параметри піропалива, %(мас.)	Традиційний піроліз Alten	Швидкий піроліз GIT	Швидкий піроліз Waterloo
С	61,9	52,2	54,2
Н	6	6,3	6,4
О	31,02	41,5	38,9
Н	1,05	-	-
S	0,03	-	-
Вода	26	26	10
Зола	1,5	-	-
Смоли	21	59	66

Згідно з аналізом робіт О.В. Золотовської та Н.Н. Харітоновим: «Погіршення якості піропалива може статися за температур понад 100°C, які несприятливо впливають на фізичні властивості рідини (збільшення в'язкості, сепарація фаз, відкладення бітумоподібного осаду внаслідок полімеризації). Для зниження в'язкості піропалива під час перекачування і розпилення нагрівають, додають воду, метанол або етанол. Під час зіткнення з повітрям також погіршується якість палива, але з меншою швидкістю, ніж при зростанні температури. Якість піропалива, отриманого піролізом біомаси, може бути недостатнім для його використання в комерційних цілях (у двигунах). Основною характеристикою, що погіршує якість піропалива, є високий вміст кисню – 25–40 %. Підвищення якості рідких продуктів піролізу ґрунтується на традиційній гідрогенізації або на цеолітової технології, спрямованих на зниження кисню в паливі»...

«Нині традиційний піроліз вважається найбільш привабливим видом, оскільки використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє мала кількість забруднювачів, якщо порівнювати зі спалюванням. Ця обставина дає екологічну перевагу переробці деяких видів відходів».

Тому впровадження новітніх технологій для підвищення ефективності на сьогодні є пріоритетом та полягає в подальшому розвитку використання в нетрадиційній енергетики як альтернатива традиційному паливу, в свою чергу, забезпечити економічний ефект.

Висновки

1. Проаналізовано виробництво теплової енергії з підвищенням її ефективності для удосконалення паливної установки з метою зниження парникових газів.
2. Виконано аналіз класифікації біомаси рослинного походження як палива (брикетування, гранулювання, біогаз, біоетанол, біодизель).
3. Виконано енергетичний потенціал біомаси: відходи злакових кукурудзи 40,1 млн. т, лузга соняшника – 21 млн.т, солома – 34,3 млн.т, лузга гречки, рису – 6,9 млн. т, енергетичні культури - верба,

тополь, рапс, міскантус і т.д.) – 11,5 млрд. м3, щепи, деревинна тирса, шкорлупа горіхів – 6,1 млн. т

4. Виконано аналіз технологій переробки біомаси для отримання біопалива. Поряд з прямим спалюванням і газифікацією, піроліз є ефективним методом термічної переробки рослинної біомаси, що дозволяє виробляти екологічне паливо з високою якістю в будь-якому агрегатному стані (рідке, газоподібне, рідинне).
5. Отже, в роботі пропонуються дослідження технології виробництва біопалива з метою підвищення його калорійності.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ КАЛОРІЙНОСТІ ГАЗУ

2.1 Обґрунтування принципу роботи класичного піролізного апарату

Для обґрунтування режимів піролізного процесу є доцільним розглянути принцип роботи піролізного агрегату (рис.2.1) – це пристрій, який дозволяє отримувати газ за допомогою піролізу деревинного палива. Камера, в якій знаходиться паливо називається паливною камерою. Спочатку паливо запалюють за допомогою вогню та дрова починають горіти як у звичайному котлі, але при досягненні температури 200 – 800 °С подача кисню в камеру згоряння зменшується, надалі починається процес піролізу палива (термічне розкладання частинок). Далі виконується виділення газу з виділенням тепла. В камері згоряння газ перемішується з більш високою кількістю кисню та займається, горіння відбувається при температурі до 1200 °С. Регулювання подачі відбувається завдяки шибера та засувки.

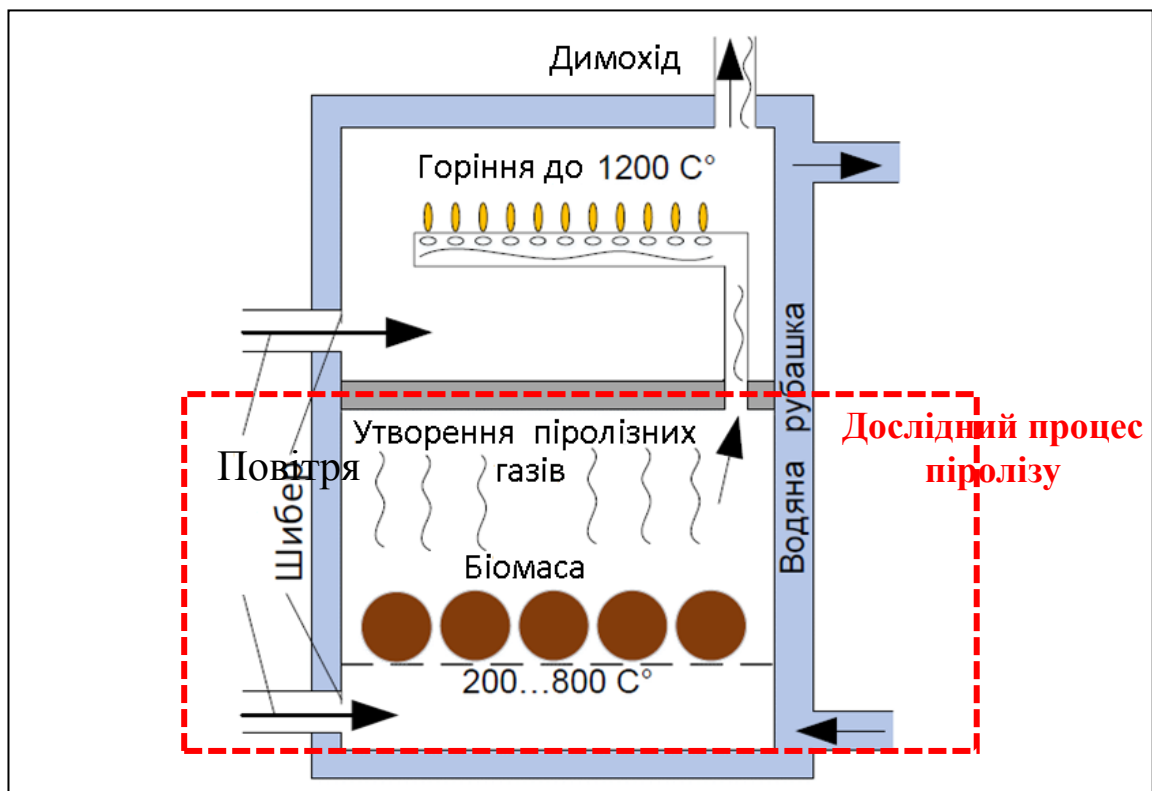


Рисунок 2.1 – Схема процесів піролізної установки

Горіння газу супроводжується високим виділенням тепла, яке взаємодіє з теплообмінником, підігріваячи тим самим воду, що проходить через теплообмінник, продукти згорання палива виходять через вихлопну трубу.

У багатьох виробників газогенераторні котли ККД варіюється у межах 70 – 80 %. Слід зазначити, що ККД котлів суттєво залежить від вологості деревини (біомаси). Наприклад, при горінні 1 кг деревини з вологістю 25% потужність складає 4 кВт, а з вологістю в 50% - потужність складає 2 кВт.

Також, можна показати на іншому прикладі, торфу вологістю 50 % з робочою теплотворною здатністю абсолютно сухої речовини 21 МДж/кг. Тобто на кожний кілограм сухої речовини такого торфу потрібно випарувати 1 кг води та нагріти отриману водяну пару до температури димових газів 100 °С. Якщо припустити, що торф використовується абсолютно сухим, тоді вихід газу складатиме 2,4 м³/кг, середня питома теплоємність приблизно дорівнює 1,39 кДж/(м³·°С) і температура газу на виході 500 °С. Тоді фізичне тепло газу або його тепловміст на 1 кг сухого торфу в межах від 100 °С до 500 °С складатиме $2,4 \cdot 1,39 \cdot (500 - 100) = 1334,4$ кДж. Якщо тепер 1 кг сухого торфу скласти з 1 кг води, тоді для цього потребується додаткове тепло на нагрів води, припустимо, від 15 °С до температури кипіння, випаровування її та перегрів отриманої пари до температури відпрацьованих газів, яка була 100 °С. Кількість даного тепла складає 2,619 МДж, при тому що тепловміст відпрацьованих газів 1 кг сухого палива складає тільки 1,322 МДж. Останні 1,297 Мдж можливо покрити тільки за рахунок згорання, а не процесом піролізу. Внаслідок цього відбувається погіршення складу газу та одночасно зниження ККД установки. Також, слід зазначити, процес сухої перегонки торфу та інших видів палива з високим вмістом кисню супроводжується виділенням тепла та обумовлює внаслідок цього потребу в меншій кількості палива, яке спалюється для випаровування вологи, однак величина теплових витрат при цьому залишається незмінною. Тому є доцільним, для точної оцінки впливу витрат тепла на випаровування вологи на ККД процесу необхідно обґрунтувати різницю температур газу при піролізі сухого та волого зразків.

2.1.1 Аналіз впливу вологи паливного матеріалу на його калорійність

Отже, додаткова кількість теплоти, яка необхідна для випаровування вологи, зазвичай умовно поділяється на дві частини: на тепло нагріву воду приблизно від 15°C до температури її випаровування плюс прихована теплота пароутворення при даній температурі та на тепло перегріву пари до температури відпрацьованих газів. Приймають, що тільки перша із зазначених частин тепла витрачається за рахунок теплотворної здатності сухого палива, друга - за рахунок тепла відпрацьованих газів. Завдяки цьому допущенню зниження ККД від вологості палива практично завжди буде трохи менше, ніж одержуване в результаті підрахунків по раніше наведеним способом, зіставлених в таблиці 2.1[11-13].

Таблиця 2.1 – Втрати тепла від вмісту вологи в вихідній сировині (на прикладі торфу) у відсотках від робочої теплотворної здатності сухої сировини

Вологість паливної сировини, %	Нижча робоча теплотворна здатність абсолютно сухої паливної речовини, кДж/кг				
	33472	29288	25104	20920	16736
10	0,86	0,95	1,14	1,37	1,7
20	1,95	2,23	2,6	3,12	3,9
30	3,35	3,83	4,47	5,36	6,7
40	5,21	5,95	6,95	8,35	10,4
50	7,81	8,93	10,4	12,5	15,6

В даній таблиці втрати тепла, обумовлені вологістю палива, дані в залежності від двох змінних: теплотворної здатності піролізного палива і його вологості. Ці ж дані графічно представлені у вигляді кривих на діаграмі рис. 2.2, зручною для швидких і легких підрахунків для проміжних значень вологості і теплотворної здатності палива.

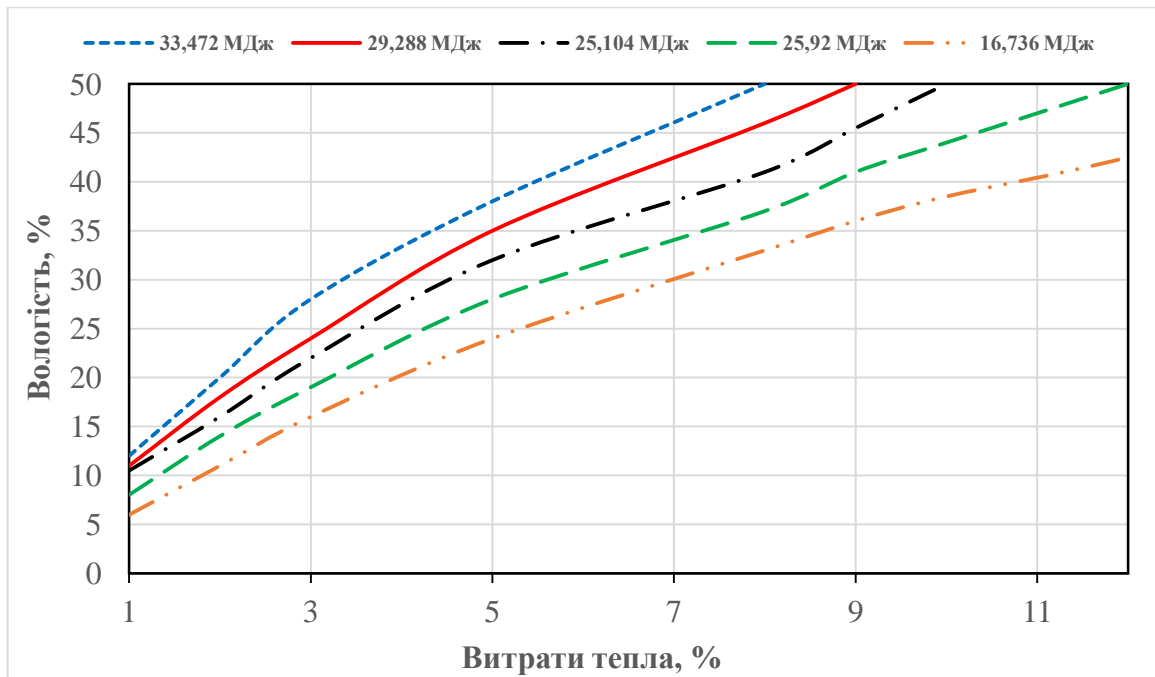


Рисунок 2.2 - Вплив вологості вихідної речовини на теплові втрати

Тому підвищена вологість палива призводить до суттєвого виділенню води у вигляді пара, який перемішується з паливним газом зменшує його концентрацію, в результаті потужність горіння знижується. Відмінною особливістю піролізних котлів є взаємодія летючих компонентів газу та його продуктів згоряння. Подібна взаємодія значно очищує викиди тяжких речовин в атмосферу.

2.1.2 Аналіз температури спалаху горючих газів

Розглянемо коротко питання, пов'язані з технікою безпеки при роботі з горючими газами, тобто, з можливістю їхнього вибуху. Існують межі вибуховості, поза якими вибух не настає ні при яких умовах. Розрізняють нижню й верхню межі вибуховості (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Межі вибуховості газів [17]

Газ	Межі вибуховості, % у середовищі			
	Повітря		кисню	
	Нижній	Верхній	Нижній	Верхній
Водень	4,1	74,2	4,0	94
Оксид вуглецю	12,5	74,2	15,5	94
Метан	5,3	14,0	5,1	61
Етан	3,2	12,5	3,0	66
Пропан	2,4	9,5	2,3	55

Межі займистості газів, що складаються із суміші горючих компонентів і не утримуючих баластових домішок, визначаються за формулою:

$$N = \frac{100}{\frac{m_1}{N_1} + \frac{m_2}{N_2} + \dots + \frac{m_i}{N_i}}, \quad (2.1)$$

де N – верхня або нижня межа запалення суміші, %; m_1, m_2, \dots, m_i – об'ємні частки горючих компонентів у технічному газі, %;

N_1, N_2, \dots, N_i – верхня або нижня межа запалення окремих горючих компонентів, %.

Запалення газоповітряних сумішей може бути мимовільним. У таблиці 2.4 наведені значення температур самоzapалення деяких горючих газів у повітрі.

Таблиця 2.4 – Температура самоzapалювання газів у повітрі[18]

Газ	Температура самоzapалювання, °C	
	від	до
Водень	510	590
Оксид вуглецю	610	658
Метан	545	850
Етан	510	595
Пропан	500	590
Бутан	430	570

Окислювання горючих газів можливо при низьких температурах, але при цьому протікає надзвичайно повільно. З ростом температури швидкість реакції окислювання зростає до настання самоzapалювання. Температура самоzapалювання залежить від змісту горючого газу в суміші, тиску, способу нагрівання суміші й так далі й тому не є однозначним препаратом.

2.2 Аналіз підвищення ефективності використання паливного газу

Отже, в дипломній роботі для підвищення ефективності використання паливного газу отриманого методом піролізу, впроваджується процес збагачення паливної суміші. Для цього, від газу, який подається до споживача

відбирається 10-20% від загального об'єму та додається знову в камеру піролізу (рис.2.3). Таким чином, можна збільшити теплотворну здатність.

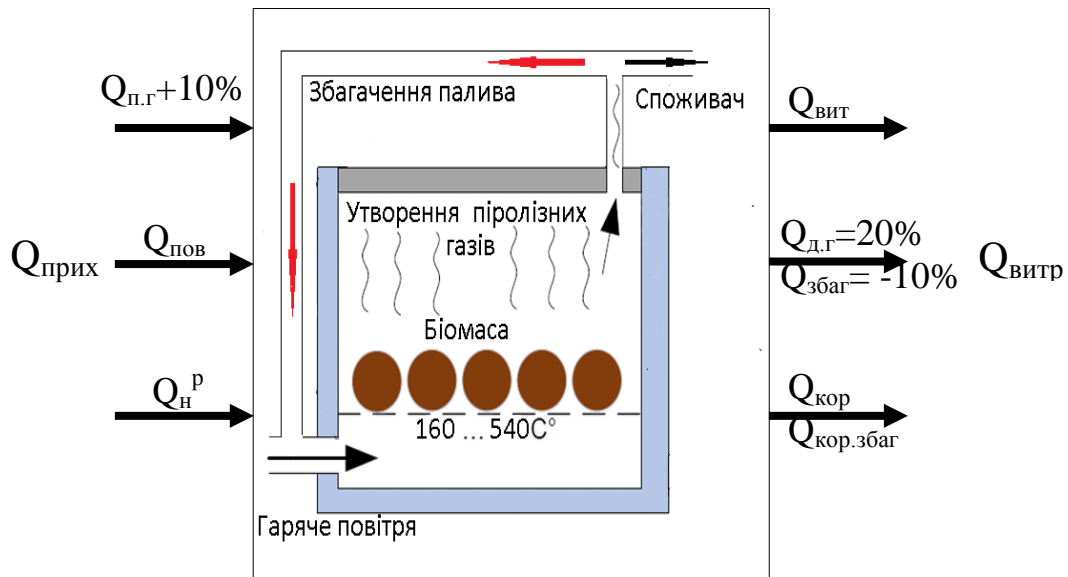


Рисунок 2.3 – Схема балансу збагачення палива

В роботі пропонується методика розрахунку сумарного виходу та концентрації компонентів піролізного газу, визначення витрат палива та повітря, теплоти згоряння паливного газу з біомаси.

Нехай піролізний газ буде ідеальним, тоді склад газу має загальний вигляд:



де CO , CO_2 , CH_4 , C_nH_m , H_2 , H_2O , N_2 , H_2S – відсотковий вміст відповідних газів по об'єму.

2.2.1 Моделювання матеріального балансу складових паливного газу

Вихідними складовими матеріального балансу є вологість біомаси та повітря, температуру повітря, а кінцевими – склад паливного газу, зола.

Отже, елементарний склад біомаси має вигляд:

$$C^p+H^p+O^p+N^p+S^p+A^p+W^p=100\% \quad (2.2)$$

де, $C^p, H^p, O^p, N^p, S^p, A^p, W^p$ – масовий відсотковий вміст елементів вихідного палива (біомаси). Для рослинного походження $S^p \approx 0$.

Перехід елементів палива ($C^p, H^p, O^p, N^p, S^p, A^p, W^p$) та гарячого повітря (вологого) в піролізний газ здійснюється по 4 основним рівнянням матеріального балансу вуглецю, водню, кисню та вологи.

Маса біомаси, яка необхідна для отримання об'єму газу по закону Авагадро:

$$G_{\delta} = \frac{V_{n.z.}}{\nu_{\delta,2}} = \frac{100 \cdot 22,4}{\nu_{\delta,2}}, \text{ кг} \quad (2.3)$$

$\nu_{\delta,2}$ – вихід газу з 1 кг біомаси, $\text{м}^3/\text{кг}$.

- Рівняння балансу вуглецю

Баланс вуглецю полягає в тому, що кількість вуглецю до та після реакцій піролізу не змінюється

$$C^p = \frac{G_{\delta} \cdot C}{100 \mu_c} = \frac{1,867 \cdot C}{\nu_{\delta,2}} \quad \text{та визначається з рівняння:} \quad (2.4)$$

μ_c – молекулярна маса вуглецю.

Після стадії сушіння вуглець в кількості C_d^p переходить в газоподібний стан ($\text{CO}, \text{CO}_2, \text{CH}_4$, тяжкий вуглець):

$$C_{\delta}^p = C \frac{(100 - \delta)}{100} \quad (2.5)$$

де C_d^p – дійсний відсотковий вміст вуглецю, який необхідний для утворення 1 м^3 піролізного газу;

δ – втрати вуглецю, які пов'язані з виділеннями золи та твердих відходів, %.

Тоді рівняння балансу має вигляд:

$$\frac{1,867 \cdot C}{\nu_{\delta,2}} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + C_n H_m \quad (2.4)$$

- Рівняння балансу водню

Весь водень в біомасі перетворюється у водень піролізного газу (вмістом водню в золі можна знехтувати). Тоді кількість водню з маси біомаси визначається з рівняння:

$$H^p = \frac{G_{\bar{o}} \cdot H}{100 \cdot \mu_{H_2}} = \frac{11,2 \cdot H}{\nu_{\bar{o},2}} \quad (2.5)$$

де μ_{H_2} – молекулярна маса водню.

Отже, рівняння балансу водню не буде включати водень з парів H_2 та O_2

$$\frac{11,2 \cdot H}{\nu_{\bar{o},2}} = H_2 \quad (2.6)$$

- Рівняння балансу кисню

Кількість кисню в біомасі:

$$O^p = \frac{G_{\bar{o}} \cdot O}{100 \mu_{O_2}} = \frac{0,7 \cdot O}{\nu_{\bar{o},2}} \quad (2.7)$$

де μ_{O_2} – молекулярна маса кисню.

Кількість повітря, яке необхідне для протікання процесу з коефіцієнтом надлишку повітря α :

$$V_n = \frac{M_n}{\mu_n} = \frac{G_{\bar{o}} \cdot V \cdot \rho_n \cdot \alpha}{\mu_n} = \frac{100 \cdot 22,4}{\nu_{\bar{o},2}} \cdot \frac{V_o \cdot \rho_n \cdot \alpha}{\mu_n} \quad (2.8)$$

де M_n – маса повітря, яка необхідна для сушіння біомаси при коефіцієнті надлишку повітря α , кг;

V_o – теоретичний об'єм повітря, необхідний для процесу 1 кг біомаси при $\alpha=1$;

ρ_n – густина повітря, кг/м³;

μ_n – уявна молекулярна маса повітря, г/моль.

$$\rho_n = \frac{B}{R_n \cdot T} - 0,0013 \frac{\varphi P_n}{T} \quad (2.9)$$

$$\mu_n = 28,96 - 10,944 \frac{\varphi P_n}{B} \quad (2.10)$$

B – тиск по барометру, Па;

φ – відносна вологість повітря, %

P_n – тиск насичення водяного пару при відповідній температурі, Па;

R_n – газова стала гарячого повітря, Дж/(кгК).

Тиск насичення водяного пара визначається з наближеної залежності:

$$P_n = 479 + (11,52 + 1,62(T - 273))^2 \quad (2.11)$$

Передбачається, що об'ємна доля кисню в повітрі дорівнює 0,21, тоді рівняння балансу кисню напишемо в наступному вигляді:

$$\frac{0,7 \cdot O}{v_{e,2}} + 0,21 v_n = CO_2 + 0,5(CO + H_2O) + 0,21 v_n^{надл} \quad (2.12)$$

де $0,21 v_n$ – кількість кисню в повітрі, який подається на установку;

$0,21 v_n^{надл}$ – кількість повітря надлишкового повітря в продуктах піролізу.

$$v_n^{надл} = \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho \beta}{v_{e,2} \mu_n}, \quad (2.13)$$

$\beta = 0$ при $\alpha \leq 1$;

$\beta = \alpha - 1$ при $\alpha > 1$.

- Рівняння балансу вологи

Кількість вологи в біомасі визначається за формулою:

$$H_2O^p = \frac{100 \cdot 22,4 W^p}{v_{e,2} \cdot 100 \cdot 18} = \frac{1,244 W^p}{v_{e,2}} \quad (2.14)$$

Кількість вологи в повітрі, який подається на установку:

$$v_{H_2O}^n = \frac{M_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} \quad (2.15)$$

M_{H_2O} – маса водяної пари, що міститься в повітрі, кг;

μ_{H_2O} – молекулярна маса води, кг/моль

Отже, кінцеве рівняння балансу вологи напишемо в наступному вигляді:

$$\frac{1,244 W^p}{v_{e,2}} + v_{H_2O}^n = H_2O \quad (2.16)$$

Оскільки розкладання водяного пару на водень та кисень можливий тільки при температурі 2000°C, що для рослинного палива не є можливим, тоді вся волога

біомаси при піролізі до 540°C переходить до водяного пару піролізного газу. Що є недоцільним, та відповідно знижує його теплотворну здатність.

Отже, результати розрахунку складу продуктів піролізу представлені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати складових матеріального балансу

CO ₂ ,%	CO,%	H ₂ ,%	H ₂ O,%
55	25	13	7

В наступному обґрунтуванні розглянемо моделювання теплового балансу, який полягає в знаходженні теплотворної здатності при оптимальних умовах отримання газу.

2.2.2 Моделювання теплового балансу

Для термічного розкладання частинок біомаси в піролізній камері необхідна тепла енергія $Q_{\text{прих}}$, яка буде підтримувати температурний режим в самій термічній камері. Тому для енергозберігаючих режимів в піролізних установках є важливою задачею як моделювання теплового балансу.

Враховуючи те, що при виробництві палива тепло втрачається в оточуюче середовище, тому співвідношення між повним теплом в піролізній камері, корисним теплом та тепловими втратами виразимо рівнянням теплового балансу для камери піролізу (рис.2.3):

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{витр}} \quad (2.17)$$

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

$Q_{\text{витр}}$ – питома витрата тепла, кДж/кг;

Розрахунок теплового балансу утворення газу в піролізній камері:

$$Q_{\text{витр}} = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{д.г}} + Q_{\text{вт.от}} + Q_{\text{вт.х}} + Q_{\text{вт.м}} + Q_{\text{вт.к}}, \quad (2.18)$$

де $Q_{кор}$ – корисне тепло використане від біомаси, кДж/кг;

$Q_{д.г}$ – витрати тепла з димовими газами, кДж/кг;

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

$Q_{вт.х}$ – витрата тепла від неповного розкладання піролізу, кДж/кг;

$Q_{вт.м}$ – витрата тепла від механічного неповного розкладання піролізу, кДж/кг;

$Q_{вт.к}$ – витрати тепла на утворення твердого осаду, кДж/кг.

Якщо припустити, що при спалюванні отриманого газу відсутня зола, то приймаємо $Q_{вт.м} = Q_{вт.к} = 0$.

Прихід тепла можна визначити з таких виразів:

$$Q_{прих} = Q_H^P + Q_{п.г} + Q_{пов} + Q_{б} \quad (2.19)$$

де Q_H^P – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг;

$Q_{п.г}$ – теплота піролізного газу, який відбирається для збагачення цього ж газу, кДж/кг;

$Q_{пов}$ – теплота повітря, кДж/кг;

$Q_{б}$ – теплота біомаси, кДж/кг.

Якщо врахувати те, що газ, приблизно 10 %, відбирають в цілях збільшення отримання тепла від піролізного газу, а теплом біомаси можна знехтувати, то отримаємо таке рівняння:

$$Q_{випр} = Q_H^P + 0,1Q_{п.г}$$

Тоді ККД піролізної установки має вигляд:

$$\eta = \frac{Q_{кор}}{Q_H^P} \quad (2.20)$$

або

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

$$Q_{вт.} = Q_{вт.x} + Q_{вт.m}$$

Витрати тепла в оточуюче середовище згідно з попередньо розрахунковими та експериментальними даними [27-32] приймаємо 6% від нижчої теплоти згоряння палива, тобто $\frac{Q_{кор}}{Q_n^p} = 0,06$, $q_{d.z.} \approx 9...10\%$

Теоретична температура димових газів визначається по формулі:

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

де T_1 – температура на вході в піролізну камеру, К

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

$$T_{d.z.} = 673 + 100 = 773 \text{ К}$$

Тоді корисне використане тепло знаходимо з рівняння:

$$Q_{кор} = Q_n^p - Q_{d.z.} - 0,1Q_{n.z.} - Q_{d.z.} \quad (2.21)$$

$$q_{кор} = 18100 - 0,09 \cdot 19100 - 0,06 \cdot 19100 = 175570 \text{ кДж/кг}$$

Звідси ККД піролізної установки:

$$\eta = \frac{17557}{19100} = 0,91$$

Отже, ККД піролізної установки з урахуванням 10% збагачення паливного газу складає 0,91.

Так як тепловий баланс складається з нижчої теплоти згорання, яка визначається розрахунковим методом, пропонується розрахунок теплоти згорання палива без збагачення по його компонентному складу:

$$Q = \sum_{i=1}^n Qi \cdot \frac{Ci}{100} \quad (2.22)$$

де n – число горючих компонентів у даному паливі; Qi - теплота згорання i -го пального компонента; Ci – процентний вміст у паливі i -го компонента.

Для практичних розрахунків можна використовувати наступну формулу:

$$Q_n^c = 107,9 H_2 + 127,7 CO + 358,3 CH_4 + 560 C_2H_2 + 590 C_nH_m \quad (2.23)$$

де Q_n^c - нижча теплота згорання газу на сухий об'єм, кДж/м³;

$H_2, CO, CH_4, \dots, H_2S$ – вміст компонентів, %.

Для перерахування на вологий газ (робочу масу) використовується формула

$$Q_n^p = k \cdot Q_n^c, \quad (2.24)$$

де k – коефіцієнт перерахування.

Для газоподібного палива коефіцієнт перерахування складу сухого газу на вологий (робочу масу палива) визначається з наступного вираження:

$$k = \frac{100 - H_2O}{100}, \quad (2.25)$$

де

$$H_2O = \frac{100W^c}{803,6 + W^c}. \quad (2.26)$$

Тут H_2O - зміна вологи в газі по об'єму, %;

W^c – абсолютна вологість або вміст водяної пари у сухому газі, г/м³; 803,6 г/м³ - густина водяної пари при 0 °С і тиску 101,3 кПа, тобто при нормальних умовах ($\rho_{H_2O} = \mu/22,4 = 18/22,4 = 0,8036$ кг/м³).

З урахуванням (4.5) рівняння (4.4) запишеться у вигляді

$$k = 1/(1 + 0,001244 \cdot W^c). \quad (2.27)$$

Склад вологого газу визначається множенням відповідних компонентів сухого газу на коефіцієнт перерахування k :

$$CO_2^B = kCO_2^c\%, \quad CO^B = k \cdot CO^c\% \quad (2.28)$$

Теплові розрахунки виконуються по робочій масі палива, що характеризує склад палива в практичних умовах його використання.

Для суміші палива теплота згорання звичайно задається. У цьому випадку необхідно визначити частку окремих видів палива в суміші і її складу.

Якщо позначити теплоту згорання суміші газів $Q_{см}$, першого газу Q' і збагаченого газу Q'' то частка першого газу в суміші

$$X = \frac{Q_{см} - Q''}{Q' - Q''}, \quad (2.28)$$

а частка збагаченого газу $(1-X)$.

Теплота згорання кожного з газів, що входять у суміш, обчислюється за формулою (4.2) відповідно до їх складу.

Після визначення частки газів склад суміші знаходять як суму добутоків відповідних компонентів першого й другого газів і їхніх часток, наприклад:

$$CO_{2см} = CO_2'X + CO_2''(1 - X). \quad (2.29)$$

Аналітичний розрахунок об'єму повітря, необхідного для процесу горіння при повному згорянні газів виконується по елементарних реакціях горіння [14].

Теоретична витрата сухого повітря, $м^3/м^3$:

$$L_0^c = A \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \quad (2.30)$$

де $A=0,00476$.

Значення коефіцієнтів m і n беруть рівними значенням індексів тих газів, перед якими знаходяться ці коефіцієнти. Наприклад, для CH_4 : $m = 1$, $n = 4$.

Витрата повітря з урахуванням його вологості W_n складе

$$L_0 = \frac{L_0^c}{k_n} = L_0^c (1 + 0,00124W_{П}). \quad (2.31)$$

Дійсна витрата повітря, що йде на горіння, визначається співвідношенням

$$L_D = \alpha L_0, \quad (2.32)$$

де α - коефіцієнт витрати або надлишку повітря.

об'єм газового палива, $м^3/м^3$:

$$V_{сум} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}, \quad (2.33)$$

де

$$V_{RO_2} = V_{SO_2} + V_{CO_2}; \quad V_{SO_2} = 0,01 \cdot H_2S;$$

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CO + CH_4 + \sum_m m C_m H_n);$$

$$V_{H_2O} = 0,01[H_2 + 2CH_4 + \sum_n \frac{n}{2}(C_m H_n)] + H_2O + 0,00124 W_{\Pi} L_D;$$

$$V_{N_2} = 0,01 N_2 + 0,79 L_D; \quad V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) L_0;$$

W_{Π} – вологість повітря, г/м³.

Другою найважливішою характеристикою палива є калориметрична (теоретична) температури палива.

Під теоретичною температурою горіння розуміється та температура, до якої нагріваються продукти згорання за рахунок теплоти, що виділяється при горінні палива. Калориметрична температура палива:

$$t_K = \frac{Q_H^p + Q_{\Phi} - Q_H}{V_D c_0^{t_K}} \quad (2.34)$$

де Q_{Φ} - фізичне тепло, внесене з підігрітим повітрям і газом, кДж/м³ або кДж/кг палива ;

Q_H - втрати тепла від недопалу палива в тих же одиницях;

V_D - об'єм продуктів піролізу, м³/м³ або м³/кг палива;

$c_0^{t_K}$ - середня об'ємна ізобарна теплоємність продуктів піролізу в інтервалі температур 0 - t_K , кДж/(м³·К) [21];.

У свою чергу

$$Q_{\Phi} = L_D h_{\Pi} + h_{\Gamma}, \text{ кДж/м}^3, \quad (2.35)$$

де h_{Π} і h_{Γ} - ентальпія відповідно повітря й газоподібного палива, кДж/м³ [21].

Середня об'ємна теплоємність газового палива відомого складу:

$$c'_p = 0,01(c'_{H_2} \cdot H_2 + c'_{CO} CO + \dots + c'_{N_2} \cdot N_2), \quad (2.36)$$

де c'_{H_2} , c'_{CO} , ..., c'_{N_2} - об'ємна теплоємність компонентів газового палива або диму, кДж/(м³·К) [21];

H_2, CO, \dots, N_2 - зміст у продуктах піролізу відповідно водню, оксиду вуглецю й інших компонентів, %.

Ентальпія продуктів піролізу визначається залежно від їхнього складу й температури за формулою, аналогічної

$$h_{д=0,01 \times (h_{CO_2} CO_2 + h_{H_2O} H_2O + \dots)}, \text{ кДж/м}^3$$

де h_{CO_2, H_2O} – ентальпія CO_2 , H_2O і інших газів, що входять до складу продуктів [21];

CO_2, H_2O – вміст цих газів у продуктах, %.

Частка повітря в продуктах піролізу:

$$V_L = (L_D - L_0) 100 / V_D$$

Величина t_k обчислюється за формулою (4.14) методом послідовного наближення у зв'язку з необхідністю визначення теплоємності по величині t_k .

З достатньої для технічних розрахунків точністю ця температура може бути знайдена на ht – діаграмі [23] по калориметричній ентальпії продуктів:

$$h_k = \frac{Q_H^p + Q_\Phi - Q_H}{V_D}, \text{ кДж/м}^3.$$

Приблизне значення дійсної температури t_d можна визначити по пірометричному коефіцієнті $\eta_{пир}$, що представляє собою відношення дійсної температури до калориметричної:

$$\eta_{пир} = \frac{421}{540} = 0,779$$

Величина пірометричного коефіцієнта в даному випадку становить 78%.

Таблиця 2.6 – Результати моделювання теплового балансу

Підведення тепла			Відведення тепла		
Параметр	кДж/кг	%	Параметр	кДж/кг	%
Початкова теплота	Без збаг.	10% збаг.			
Q_H^p	14200-	14200	$Q_{кор}$	4995,95	27
$Q_{п.г}$	357	1810	$Q_{д.г}$	298	1,6
$Q_{пов}$	3000	-	$Q_{виг.от}$	3461,58	13,2
$Q_б$		3000	$Q_{вт.х}$	10344,47	57
	17557	19100		19100	100

Отже, в результаті відбору 10% паливного газу можна підвищити його теплотворну здатність до 19100 кДж/кг. Таким чином, ККД збільшується від 0,779 до 0,91.

2.3 Моделювання сумарного виходу продуктів термічного розкладання

Вихід летючих компонентів при термічному розкладанні біомаси уточнює бачення щодо властивостей палива, але тільки при оцінці процесу при відносно повільному нагріву. Точний розрахунок складу продуктів піролізу в залежності від температури та часу представляє складну задачу. Біомаса для палива – це складний комплекс речовин, фізико-хімічна структура якого та форма зв'язків між якими недостатньо вивчені. Сам процес термічного розкладання окремих часток палива представляє розрив фізико-хімічних зв'язків всередині цих складових з утворенням численних нестійких активних продуктів. Останні дуже швидко реагують між собою, в результаті чого утворюються більш стійкі продукти піролізу – летючі та горючі компоненти, зола та інш. В ході інженерних задач склад продуктів піролізу палива не потребується, але потрібні відповіді на питання: кількість летючих компонентів в паливі; час та процентне відношення розкладання часток (при відповідному температурному режимі). Сумарний вихід летючих пов'язаний з співвідношення вмісту вуглецю та водню в паливі. З метою отримання характеристик летючих виконаємо апроксимацію цих залежностей.

$$V_l^n = 8,33 \frac{H^n}{C^n} - 0,165 \quad (2.37)$$

Для сумарного вмісту (у відсотках) вуглецю в летючих C_l^n :

$$\frac{C_l^n}{C_n} = 380 \frac{H^n}{C^n} - 26 \quad (2.38)$$

Для більш точного збігу теоретичних та експериментальних даних скористуємось двокомпонентною схемою. Якщо температура являється функцією часу, то вирішення задачі визначається залежністю:

$$V = \sum_{i=1}^n C_{0i} \left(1 - e^{-\int_0^{\tau} r_{0i} e^{\frac{-E_i}{RT(\tau)} d\tau} \right) \quad (2.39)$$

$T(\tau)$ – зміна температури біомаси за час.

$T(\tau)$ можна апроксимувати лінійною залежністю, тоді інтеграл з залежності (2.39) напишемо в наступному вигляді:

$$\int_0^{\tau} r_{oi} e^{\frac{-E_i}{RT(\tau)}} d\tau = \frac{r_{oi} E_i}{2,303 R b} \left[H \left(\frac{2,303 R T}{E_i} \right) - H \left(\frac{2,303 R T_0}{E_i} \right) \right]$$

b – швидкість підвищення температури, м/с;

T_0 – початкова температура, °С;

T – поточна температура, °С;

R – газова стала, Дж/°С·кг.

Якщо прийняти максимальний вихід летючих компонентів за $\sum_{i=1}^n C_{oi} = 85,2\%$ при температурі 540 °С, швидкість прогріву біомаси 25 °С/сек, стала швидкості реакції, яка характеризує руйнування групи зв'язків $r_0 = 83,3 \text{ с}^{-1}$ отримаємо залежність сумарного виходу від часу:

$$V = 0,852 \left(1 - \exp \left[- \int_0^{\tau} 83,3 e^{\frac{-29300}{8,314 \cdot 25 \cdot \tau}} d\tau \right] \right) \quad (2.40)$$

Позначимо символом I інтеграл у показнику ступеня e через $\tau = 0,1 \text{ с}$.

$$\begin{aligned} I &= \frac{83,3 \cdot 29300}{2,303 \cdot 8,314 \cdot 25} \left(H \frac{2,303 \cdot 8,314 \cdot 49}{29300} - H \frac{2,303 \cdot 8,314 \cdot 1}{29300} \right) = \\ &= 260,1 (H(0,2104) - H(0,178)) = 260,1 (4,3 \cdot 10^{-7} - 0,92 \cdot 10^{-7}) = 8,79 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Отже

$$V = 0,852 (1 - e^{-8,79 \cdot 10^{-5}}) = 0,00001\%$$

В результаті даної відповіді, в подальшому обчислення проводимо через 10 сек.

Отже, через $\tau = 10 \text{ с}$

$$I = 260,1 (H(0,657) - H(0,178)) = 260,1 (0,39 \cdot 10^{-2} - 0,92 \cdot 10^{-7}) = 5,014$$

$$V = 0,852 (1 - e^{-5,014}) = 4,56\%$$

Результати розрахунку в інтервалі часу 0,1 с – 10 хв. представлено в таблиці

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку виходу летючих газу від часу

Час, с	0,1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Вихід летючих, %	0	5,014	5,92	6,06	6,99	7,361	7,97	8,64	9,02	9,23	9,99
Час, с	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
Вихід летючих, %	10,05	10,59	10,99	11,0	11,58	12,06	12,58	13,07	13,82	14,08	14,68
Час, с	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320
Вихід летючих, %	15,09	16,12	17,86	18,94	19,64	20,03	21,82	22,01	22,45	22,89	23,07
Час, с	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430
Вихід летючих, %	23,67	24,06	25,64	26,73	27,09	28,42	29,96	32,56	34,78	37,45	39,98
Час, с	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Вихід летючих, %	42,05	45,01	47,12	49,87	51,036	54,87	57,98	60,14	62,18	65,34	68,49
Час, с	550	560	570	580	590	600					
Вихід летючих, %	70,25	73,45	76,87	80,99	82,45	85,2					

Звісно, приведений розрахунок є приблизним. Він, зокрема, передбачає незалежність істинної швидкості виходу окремих складових продуктів піролізу від темпу нагріву та не враховує вторинне розкладання частинок. Мабуть, темп нагріву може впливати на специфіку реакції первинного розкладання органічної маси (біомаси). Очевидно, що основний вплив на склад продуктів піролізу виявляє температурний рівень процесу та час перебування часток у вже утворених продуктів в піролізній зоні. Що й і буде розглянуто в наступному розділі.

Висновки

1. Виконано обґрунтування класичного піролізного пристрою, в якому відбувається погіршення складу газу та одночасно зниження ККД установки, за рахунок високого вмісту вологи рослинної біомаси. Отже, тепло витрачається на її видалення.
2. Розглянуто коротко питання, пов'язане з горючими газами, тобто, з можливістю їхнього вибуху. Температура samozапалювання залежить від

змісту горючого газу в суміші, тиску, способу нагрівання суміші й тому не є однозначним параметром.

3. В роботі пропонується методика розрахунку сумарного виходу та концентрації компонентів піролізного газу, визначення витрат палива та повітря, теплоти згоряння паливного газу з біомаси.
4. Отже, в результаті відбору 10% паливного газу можна підвищити його теплотворну здатність до 19100 кДж/кг. Таким чином, ККД збільшується від 0,779 до 0,91.
5. Очевидно, що основний вплив на склад продуктів піролізу виявляє температурний рівень процесу та час перебування часток у вже утворених продуктів в піролізній зоні. Що й і буде розглянуто в наступному розділі.

3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Розробка експериментального стенду

Для підвищення якості паливного газу та подальшого його використання в піролізних установках або для сушки матеріалів продуктами згоряння цього газу є необхідністю виконати аналіз стадії піролізу. Ефективність використання паливного (піролізного) газу залежить від наступних параметрів: вологість біомаси, витрат повітря та біомаси, складу дослідного палива, теплотворної здатності. Для цього необхідно визначити режими отримання паливного газу: температура повітря, температура термічного розкладання частинок біомаси, температура і тиск в дослідній установці.

Дослідження проводились на зразках деревинної тирси, шкарлупі горіхів та лущиння соняшника (рис.3.1)



Рисунок 3.1 – Дослідні зразки

Етапи проведення експериментальних досліджень термічної обробки біомаси в наступному вигляді:

1. Спочатку відбувається розігрів системи та визначення вологості біомаси;

2. Задаються параметри режимів (температура підігрітого повітря, витрати біомаси, витрати повітря), показники ефективності процесу;

3. Встановлюється сталий режим піролізу (15 хв) та визначаються основні параметри: температури в камері піролізу по всій висоті; вміст летючих компонентів в суміші гарячого повітря з продуктами піролізу;

4. Завершення процесу та визначення якості палива по отриманим показникам.

На початковому етапі, нагрів біомаси призводить до видалення вологи (яскраво виражений ендотермічний процес), де вологість, в свою чергу, є одним з найважливіших показників стану матеріалів рослинного походження, що використовуються в експериментальній установці при виробництві біопалива. Вона впливає на такі показники як час підігріву сировини, швидкість витання часток, сумарний вихід летючих компонентів піролізу, газопроникність шару відходів і його гідравлічний опір, витрата повітря і біомаси, початкова температура підігріву повітря, питома витрата біомаси.

Для визначення процесу піролізу рослинних відходів була створена експериментальна установка (рис.3.2), яка складається з камери піролізу 2 (I стадія-сушка) з бункером завантаження біомаси 5; 2-ї камери піролізу 12 (отримання піролізного газу); пробовідбірник газів 14; для контролю температур встановлені термомпари 4,7; вентиль 1- для підведення повітря в камеру 2 та в систему реєстрації даних 6. Друга камера піролізу 12 має кришку 8 з закріпленими на ній термомпарами 7, патрубками для підведення 3 та відведення 15 обігрівальної газоповітряної суміші, створеної в камері піролізу 2; патрубка 17 для відведення піролізного газу; камери нагріву 11, що представляє собою циліндр, в нижній частині якого розташований колосник 16, який запобігає розсип матеріалу в нижню частину камери. Між корпусом 9 та камерою нагріву 11 встановлюється спіралеподібна направляюча 10, яка служить для рівномірного розподілу газу, який омиває стінки корпусу камери нагріву 11. Патрубки 13 та 15 також можна використовувати для швидкого охолодження камери піролізу. Конструкція камери виконана з нержавіючої сталі. Для запобігання теплових витрат, установка виконана з двошаровою

теплоізоляцією: азбест та мінеральна вата. Зовнішній вигляд установки показано на рисунку 3.3.

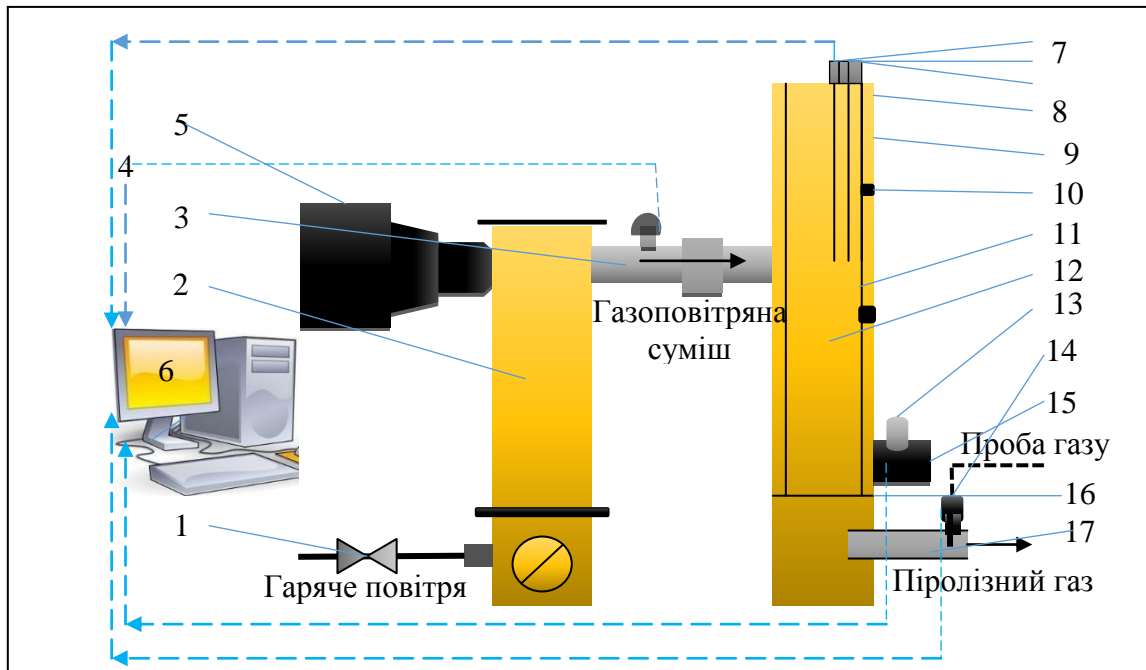


Рисунок 3.2 – Схема експериментальної установки для визначення параметрів процесу піролізу біомаси



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд експериментальної установки

Були проведені експериментальні дослідження по визначенню параметрів процесу, який протікає в зонах піролізу: тривалість процесу, кінетична температура шару, витрати біомаси.

Для визначення витрати біомаси, експерименти проводились таким чином: запускається камера 2, яка за рахунок топкових газів прогріває герметично закриту камеру 12 до досягнення в ній необхідної температури. Згідно експерименту, температура варіювалась від 350 до 650 °C з шагом 100 °C, та надалі підтримувався заданий температурний режим. Надалі в підігріту камеру 11 піролізної камери 12 після відкриття кришки 8 виконується завантаження по 1 кг підготовленої біомаси (лушпиння сояшника, тирса, шкарлупа горіхів). Тобто досліди виконувались для кожних відходів окремо. Біомаса мала початкову вологість 10 % та температуру 20 °C. Після цього камера 11 знов герметично закривається кришкою 8. Під час процесу піролізу термopарами 4 та 7 контролюється зміна температури газоповітряної суміші на вході та виході з камери відповідно. Температура топкових газів на вході в камеру 12 регулюється шляхом зміни витрати дуттьового гарячого повітря в камеру 2. В момент стабілізації параметрів процесу завдяки пробовідбірника 14 відбувається відбір проби піролізного газу та вимірювання температури. Остання частина піролізного газу, у зв'язку з його малою кількістю викидається в атмосферу. По завершенню експерименту камери 2 та 12 охолоджуються до температури 50 °C. Далі утворений твердий осад (коксний залишок) та зола зважуються на вагах з точністю до 0,1 г та обчислюється зміна маси вихідного матеріалу. З проб твердого залишку та піролізного газу хроматографічним методом визначається кількість та концентрація летючих компонентів. В результаті обробки даних, отримані в процесі експерименту, побудовані графічні залежності при різних режимах роботи установки (розділ 3.4).

3.2 Визначення вологості дослідних зразків

Слід зазначити, що спочатку нагрівається біомаса, це призводить до видалення води. В свою чергу, вологість є, один з найважливіших показників біомаси, з якої отримується біопаливо. А саме: час підігріву сировини, загальний вихід летючих елементів газу, витрата повітря, питома витрата біомаси, початкова температура підігрітого повітря.

В таблиці 3.1 представлена вологість експериментальної сировини .

Проводились вимірювання вологості біомаси (тирса, шкарлупа горіха, лушпиння сояшника) з вмістом волого 5 – 45 %. Отже, енергоємність процесу зв'язно залежить від зниження вологості сировини. Тому є доцільним узгодження в піролізній установці режими нагріву або сушіння біомаси та перехід до самого процесу розкладання часток.

Таблиця 3.1– Теплоенергетична ємність експериментальної сировини.

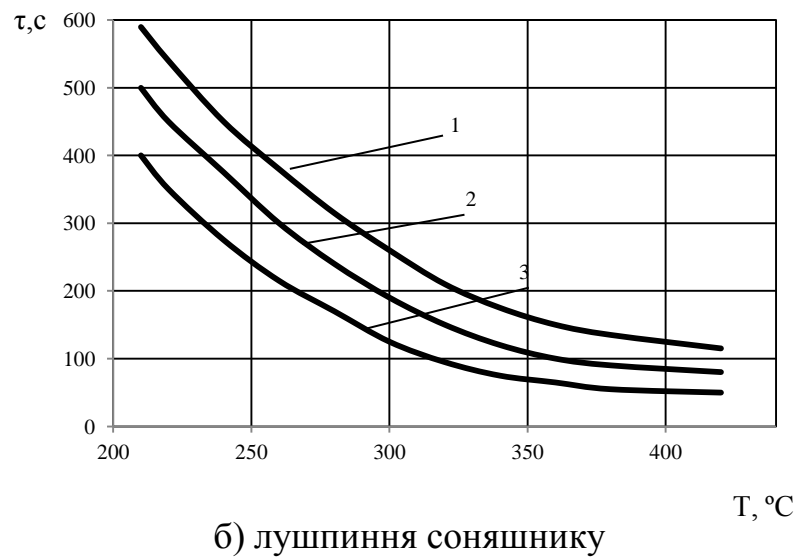
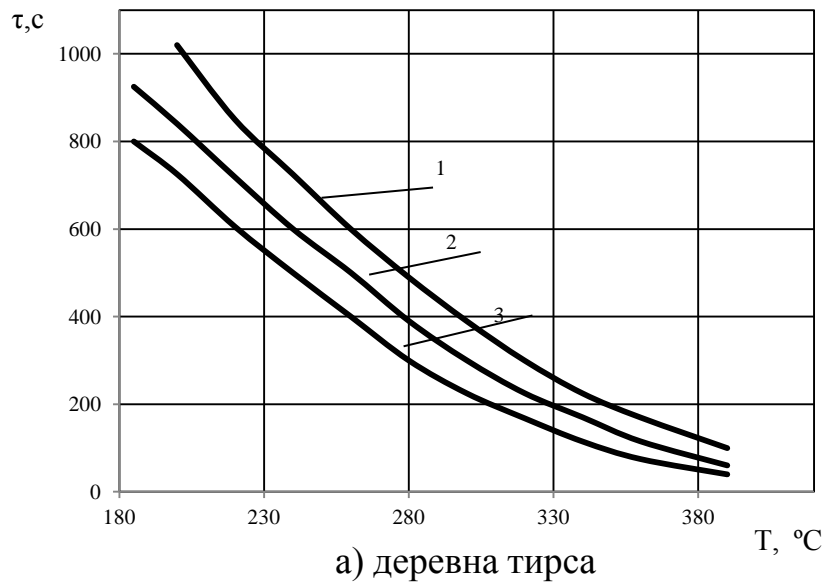
Вид	Зміст води, %	МДж/кг	кВтч/кг
Деревна тирса	30	14.1	3.9
	10	18.2	
Шкарлупа горіхів	25	14.3	3.9
	10	18.5	
Лушпиння сояшнику	30	14.2	3.9
	10	18.3	

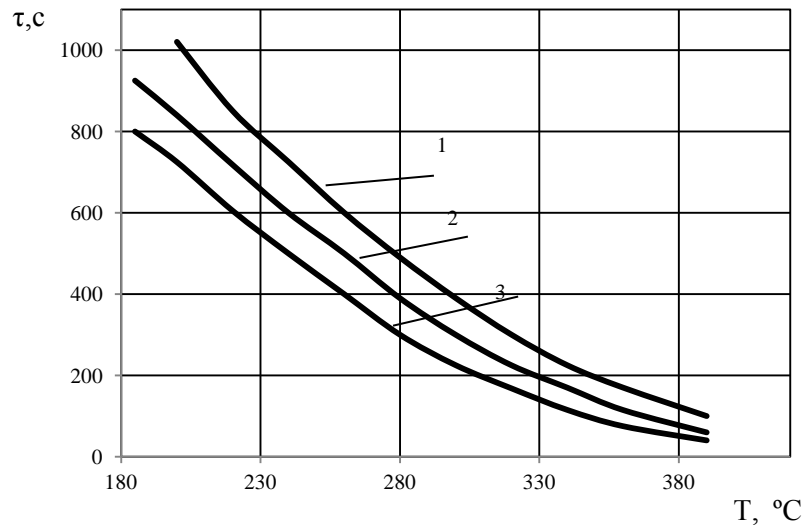
Дані дослідження можуть здійснюватись при використанні вологоміра для твердої біомаси. В роботі використовували вологомір типу MMS-5-1-15. Він дозволяє виконувати вимірювання в широкому діапазоні значень в дослідній установці.

Таке узгодження, як показали дослідження, може бути здійснено з використанням в системі управління установки поточного автоматичного вологоміра біомаси. Аналіз великої кількості вимірювальних схем і результатів випробувань вологомірів показали, що вимірювальна схема вологоміра типу MMS-5-1-15 дозволяє забезпечити вимірювання практично в усьому діапазоні вологості біомаси, яка надходить до установки. Результати вимірювань представлені у вигляді графічних залежностей (рис. 3.5) для кожного зразку.



Рисунок 3.4 – Вологомір типу MMS-5-1-15





в) шкарлупа горіха

Рисунок 3.5 – Залежність часу прогріву від вологості зразків

1- вологість 45%; 2 – 25%; 3 – 5 % суха частинка

3.3 Визначення якості паливного газу

Відносна кількість складових паливного газу залежить головним чином від температури в зоні термічного розкладання часток, від кількості водяної пари, втрат тепла, витрат повітря та біомаси, виду самої біомаси, теплотворної здатності отриманого палива. Чим вище температура згоряння, тим більше ККД установки (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Теплотворна здатність газів []

Газ	Теплотворна здатність			
	нижча		вища	
	Ккал/м ³	МДж/ м ³	Ккал/м ³	МДж/ м ³
CO	3045	12,75	3045	12,75
H ₂	2580	10,81	3063	12,83
CH ₄	8500	35,61	9460	39,63
C _m H _n	14000	58,66	14960	62,68

$$1 \text{ ккал/м}^3 = 0,00419 \text{ МДж/м}^3$$

$$1 \text{ ккал/кг} = 4,19 \text{ кДж/кг}$$

Отже, на теплоту згоряння впливає склад паливного газу. Тому є доцільним дослідити склад газу та з'ясувати яким чином можна підвищити його якість.

3.3.1 Визначення кількісного складу паливного газу

Склад летючих компонентів продуктів піролізу визначали методом газової хроматографії. Для поділу вуглеводневих газів використовували хроматограф в ізотермічному режимі. Тобто, сутність цього методу полягає в фізичному розподілі газової суміші на окремі компоненти, заснованому на відмінності їх фізико-хімічних властивостей [27]. Загальна принципова схема хроматографа представлена на рисунку 3.6.

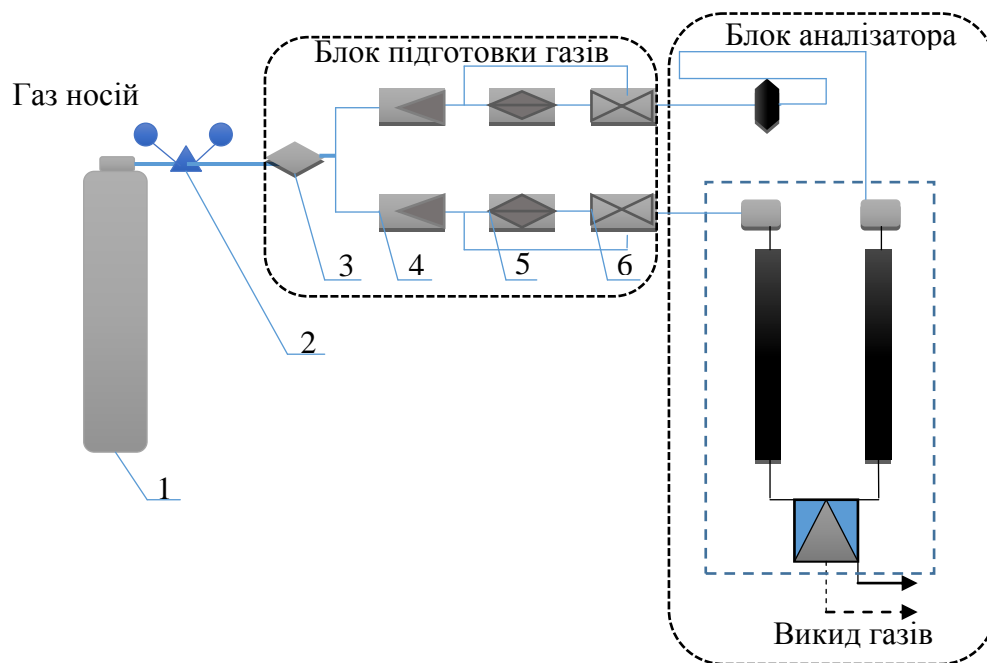


Рисунок 3.6 – Загальна схема газового хроматографа

1-балон з газом носієм, 2-редуктор, 3-фільтр, 4-редуктор тиску, 5-дросель точного регулювання, 6-регулятор витрат, 7-газовий дозатор, 8-випарник, 9-колонка, 10-детектор.

Газ-носіє (азот) з балону 1 через балонний редуктор 2 під тиском від 1,5 до 4 кгс / см² подається на вхід блоку підготовки газів, де він поділяється на два потоки, кожен з яких проходить через прилади регулювання та стабілізації тиску та витрат. Обидва газових потоку надходять у вузли введення проби - випарники 8. З випарника газ-носіє надходить в колонки 9, а з виходу колонок - в детектор теплопровідності 10. В колонці, в якій відбувається поділ введеної проби, називається робочою, а колонка, через яку проходить чистий газ-носіє - порівняльною. Наявність в приладі двох колонок дозволяє здійснювати

введення проб в будь-яку з них через відповідний випарник. Сигнал детектора визначається різницею складу газів, що проходять через два його вимірювальних каналів (газ з колонки 1 і газ з колонки 2).

Аналіз проводили на приладі Біохром-1, принципова схема якого представлена на рисунку 3.7.

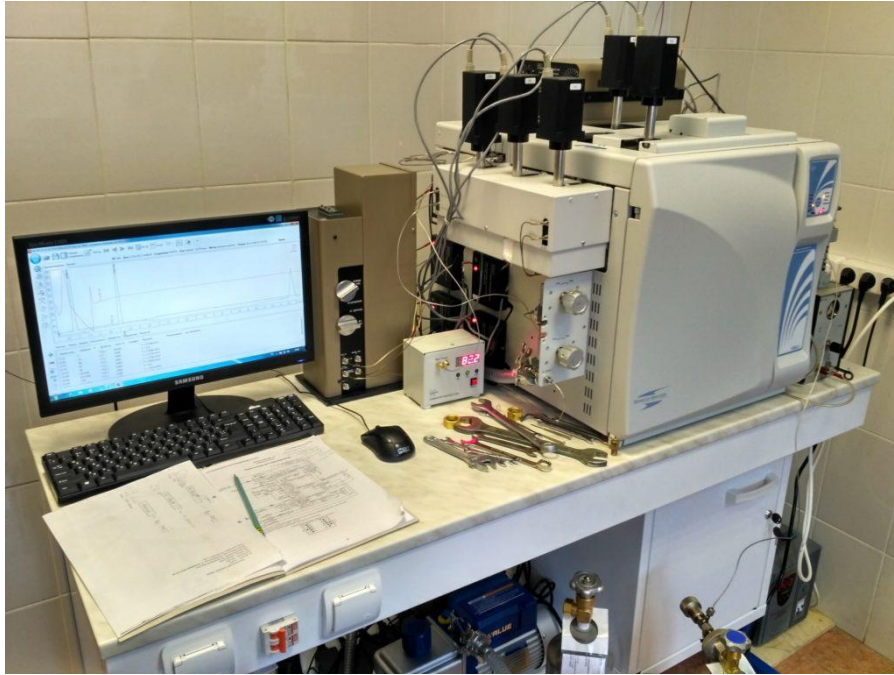


Рисунок 3.7 – Визначення складу паливного газу в лабораторних умовах

3.3.2 Методика визначення хроматографічних параметрів

Для визначення параметрів хроматографічного поділу піків на хроматограмі (рис.3.8)

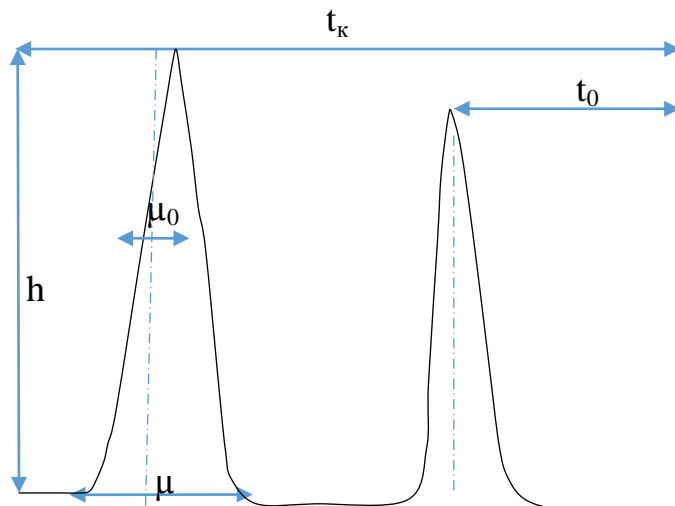


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема

Якщо компонент не сорбується, тоді в хроматографічній колонці 9 (рис.8) він не затримується та виходить з неї з швидкістю газа-носія. Здатність колонки характеризується часом утримування t_R :

$$t_R = t_{R0} + t_R' \quad (3.1)$$

де t_{R0} – час перебування речовини в рухомій фазі;

t_R' – час перебування речовини в нерухомій фазі.

Значення t_R фактично дорівнює часу проходження через хроматограф компонента, який не сорбується, а також від щільності набивки колонки, тому навіть в аналогічних колонках він відрізняється. Для характеристики справжньої утримуючої здатності колонки вводять виправлений час утримування t_R' :

$$t_R' = t_R - t_{R0}$$

В наших дослідах обладнання не дозволяє вимірювання часу утримування, безпосередньо на хроматограмі визначаємо відстань утримування l_R – відстань від моменту вводу проби до появи максимуму відповідного піку. Виправлена відстань утримування l_R' – відстань від максимуму піку газу, який не сорбується до максимуму відповідного піка:

$$l_R' = l_R - l_{R0} \quad (3.2)$$

Визначення відстані часу утримування знаходить з формули:

$$t_R = \frac{l_R}{q} \quad (3.3)$$

де q – швидкість руху діаграмної стрічки.

Утримуючий об'єм V_R – об'єм рухомої фази (см^3), який пройшов через колонку від моменту вводу проби до появи максимуму піку:

$$V_R = t_R \cdot F, \quad (3.5)$$

F – об'ємна швидкість потоку, ($\text{см}^3/\text{с}$).

Виправлений утримуючий об'єм V_R' має вигляд:

$$V_R' = V_R - V_{R0} = F \cdot (t_R - t_{R0}). \quad (3.6)$$

Так як в роботі метою є виявлення якісних показників газу, тому для точних вимірювань (для ідентифікації та визначенні фізико-хімічних констант) вводиться поправка на стислість газу-носія. Її визначають з формули Джеймса і Мартіна:

$$f_i = \frac{3 (P / P_0)^2 - 1}{2 (P / P_0)^3 - 1} \quad (3.7)$$

де P – тиск газу на вході в хроматографічну колонку;

P_0 – тиск на виході з колонки.

Для точного вимірювання необхідно привести об'єм пропущеного газу-носія, температура якого вимірюється на виході з колонки T_k (після ротометру), до температури хроматографічної колонки T_R , вводиться поправка:

$$f_2 = \frac{T_k}{T_R} \quad (3.8)$$

Справжній утримуючий об'єм:

$$V_{RN}' = (t_R - t_{R0}) F f_1 f_2. \quad (3.9)$$

Питомий утримуючий об'єм при температурі колонки отримують діленням справжнього об'єму на масу адсорбенту в колонці, г:

$$V_g = \frac{(t_R - t_{R0}) F f_1 f_2}{g} \quad (3.10)$$

Для подальшого обчислення питомий утримуючий об'єм приводиться до 273 К:

$$V_g = \frac{(t_R - t_{R0}) F f_1 f_2}{g} \cdot \frac{273}{T_k} = \frac{V_R'}{g} \cdot \frac{273}{T_k} \quad (3.11)$$

Фізико-хімічна константа знаходиться відношенням питомого утримуючого об'єму до питомої поверхні адсорбенту:

$$V_s = \frac{V_g^0}{S_{y\delta}} \quad (3.12)$$

Питомий утримуючий об'єм пов'язаний з коефіцієнтом розподілу:

$$K = \frac{V^0}{\rho} \quad (3.13)$$

де ρ – густина нерухомої фази.

Для ідентифікації компонентів дослідних сумішей в хроматографі доцільно використати відносний час утримування t'_{Ronm} або відносний утримуючий об'єм V'_{Ronm} визначаються по формулам:

$$t'_{Ronm} = \frac{t_{R_i} - t_{R_0}}{t_{R_{cm}} - t_{R_0}} = \frac{t'_{R_i}}{t'_{R_{cm}}} \quad (3.14)$$

$$V'_{Ronm} = \frac{V_{R_i} - V_{R_0}}{V_{R_{cm}} - V_{R_0}} = \frac{V'_{R_i}}{V'_{R_{cm}}} \quad (3.15)$$

t_{R_i} та $t_{R_{cm}}$ - вимірювальний час i -го компонента, та компонента прийнятого за стандарт.

Відносні параметри використаємо для оцінки селективності колонки. Для цього розрахуємо характеристики розподілу.

Ступінь розподілу двох сусідніх піків на хроматограмі обчислюється з формули:

$$\alpha_{2,1} = \frac{t'_{R_2}}{t'_{R_1}} = \frac{V'_{R_2}}{V'_{R_1}} \quad (3.16)$$

$t'_{R_{1,2}}$ та $V'_{R_{1,2}}$ - виправлені характеристики утримування між 1 (слабший компонент утримувач в колонці) та 2 (сильній компонент).

Якщо ступінь розподілу менше або дорівнює 1, то компоненти не розділяються.

Коефіцієнт селективності колонки K_c визначається з формули:

$$K_c = \frac{\Gamma_2 - \Gamma_1}{\Gamma_2 + \Gamma_1} \approx 2 \frac{V_{R_2} - V_{R_1}}{V_{R_2} + V_{R_1}} \quad (3.17)$$

Γ_2 та Γ_1 – загальні коефіцієнти Генрі двох компонентів, які розділяються;

$V_{R_{1,2}}$ - утримуючі об'єми цих же компонентів.

Узагальнений критерій розподілу – величина розширення двох сусідніх піків

$$R_{s_1} = 2 \frac{l_2 - l_1}{m_2 + m_1} = 2 \frac{t_{R_2} - t_{R_1}}{m_1 + m_2}$$

$$R_{s_1} = \frac{l_2 - l_1}{\mu_{0,5(1)} + \mu_{0,5(2)}} = \frac{t_{R_2} - t_{R_1}}{\mu_{0,5(1)} + \mu_{0,5(2)}} \quad (3.18)$$

$$R_{s_2} = 0,848 R_{s_1}$$

μ_1, μ_2 – ширина піків в основі, $\mu_{0,5(1)}, \mu_{0,5(2)}$ – на середині висоти.

Розділення враховується повним якщо $R_s > 1,5$.

Коефіцієнти розподілу (в том числі коефіцієнти Генрі) використаємо в розрахунку швидкостей руху компонентів через колонку. Залежність швидкості переміщення зони компоненту від параметрів колонки визначається з рівняння:

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}_s}{V_C + K \cdot V_1} \quad (3.19)$$

де \bar{U} – середня швидкість переміщення зони компоненту;

\bar{U}_s – середня лінійна швидкість газа-носія;

V_C – об'єм газової фази в колонці;

V_1 – об'єм нерухомої газової фази в колонці при відповідній температурі;

K – коефіцієнт розподілу

$$V_1 = \frac{g \cdot C}{\rho \cdot 100} \quad (3.20)$$

де g – маса сорбенту;

C – вміст нерухомої фази в носії, %

Фактор запізнення R_f – відносна швидкість запізнення хроматографічної зони – показує наскільки повільніше рухається через відповідне з'єднання в порівнянні з газом, який не сорбується.

$$R_f = \frac{t_{R_0}}{t_R} = \frac{V_{R_0}}{V_R} \quad (3.21)$$

Величина $R_f < 1$.

Таблиця 3.3 – Показники хроматографа для дослідних зразків

Компонент	$t_{R0,c}$	$t_{R,c}$	$t'_{R,c}$	$V_{R,cm}^3$	$V'_{R1,cm}^3$	$V'_{R,cm}^3$	$V_{E,cm}^3$	$V'_{Ropt,cm}^3$	K	K_c	R_{s1}	R_{s2}	k_i
Деревинна тирса													
CO	15	60	45	21	2,5	13	3,1	9,5	1,15	0,1	4,1	3,48	1,5
H ₂	15	56	41	19	3,3	9	3,2	9,56	1,25	0,12	3,9	3,3	1,8
CH ₄	15	47	32	22	4,5	11	3,99	9,67	1,3	0,11	5,6	4,74	2,9
C _m H _n	15	69	54	25	1,2	15	3,5	10	1,21	0,13	6,1	5,71	4,7
CO ₂	15	45	30	24	4	16	3,1	8,99	1,19	0,11	5,9	5	1,9
H ₂ S	15	57	42	20	2,3	17	2	9,1	1,2	0,18	4,8	4,07	3,1
Шкарлупа горіха													
CO	12	60	48	21	2,5	13	3,1	9,5	1,51	0,11	3,7	3,1	1,6
H ₂	12	56	44	19	3,3	9	3,2	9,56	1,23	0,13	5,4	4,6	2,1
CH ₄	12	47	35	22	4,5	11	3,99	9,67	1,38	0,14	5,9	5	2,5
C _m H _n	12	69	57	25	1,2	15	3,5	10	1,24	0,1	6,3	5,3	4,4
CO ₂	12	45	12	24	4	16	3,1	8,99	1,19	0,18	8,9	7,5	2,2
H ₂ S	12	57	45	20	2,3	17	2	9,1	1,21	0,15	4,5	3,8	3,4
Лушпиння сояшника													
CO	18	60	42	21	2,5	13	3,1	9,5	1,15	0,11	2,9	2,45	1,5
H ₂	18	56	38	19	3,3	9	3,2	9,56	1,25	0,13	5,8	4,91	1,8
CH ₄	18	47	29	22	4,5	11	3,99	9,67	1,3	0,14	6,3	5,34	2,9
C _m H _n	18	69	51	25	1,2	15	3,5	10	1,21	0,1	6,9	5,85	4,7
CO ₂	18	45	18	24	4	16	3,1	8,99	1,19	0,18	5,5	4,66	1,9
H ₂ S	18	57	39	20	2,3	17	2	9,1	1,2	0,15	4,3	3,64	3,1

Важливу роль в хроматографічному процесі відіграє коефіцієнт вилучення k_i , який характеризує ємність утримання колонки і показує в скільки разів велична довше знаходиться в нерухомій фазі, чим в рухомій. Для кожної речовини коефіцієнт визначається як відношення кількості цієї речовини в нерухомій та рухомій фазах. Отже, коефіцієнт вилучення обчислюється з формули:

$$k_i = \frac{c_{i,l} \cdot V_1}{c_{i,c} \cdot V_C} = K_i \frac{V_1}{V_C} = \frac{t'_R}{t'_{R_0}} \quad (3.22)$$

$c_{i,l}$ – концентрація компонента в нерухомій фазі;

$c_{i,c}$ – концентрація компонента в газі-носії.

Оптимальні значення коефіцієнту лежать у межах 1,5 – 4. Якщо коефіцієнт менше 1,5, значить речовина погано утримується в колонці і має швидкість газа-носія, якщо більше 5, то час перебування, час перебування речовини буде більшим, і на аналіз також потребується більше часу.

Отже, отримані основні хроматографічні характеристики представлені в таблиці 3.3 для всіх дослідних зразків.

Отримані хроматографічні залежності показані на рисунках 3.9 – 3.11.

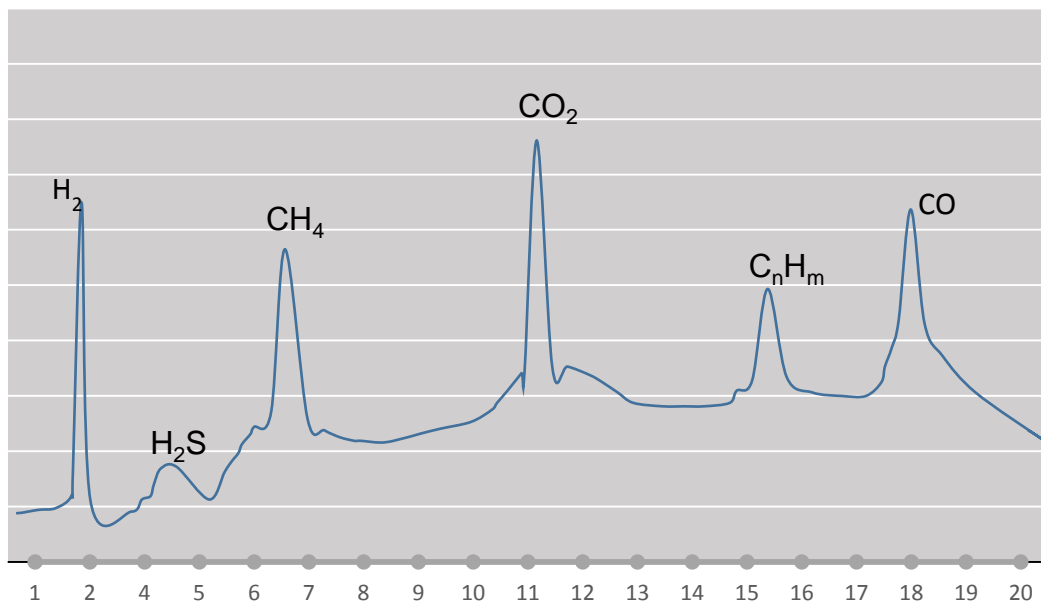


Рисунок 3.9 – Вихід летючих компонентів з деревини тирси

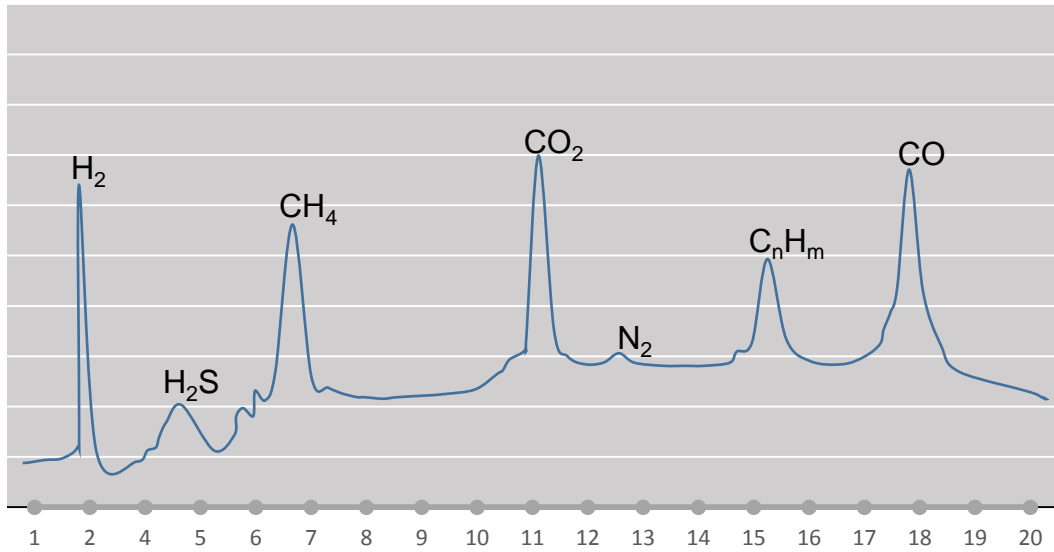


Рисунок 3.10 – Вихід летючих компонентів з тирси шкарлупи горіхів

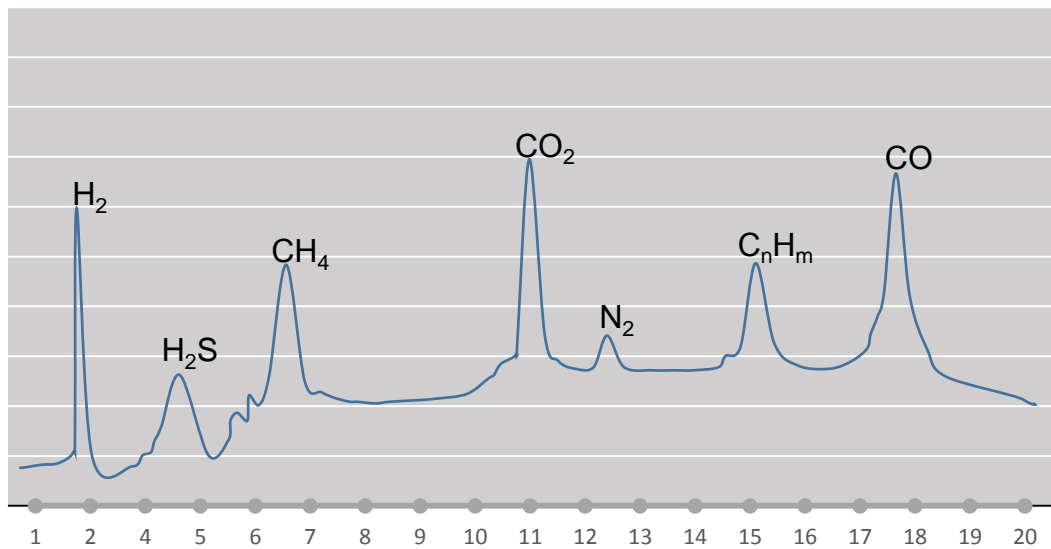


Рисунок 3.11 – Вихід летючих компонентів з лушпиння соняшника

Виконаємо обчислення виділених компонентів дослідного газу. Якщо розглядати отримані хроматограми, то бачимо 7 піків, звідси

$$0 \dots 6 = \text{H}_2/\text{N}_2/\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4/\text{C}_n\text{H}_m$$

Отже, концентрація кожного компонента визначається з формули:

$$C_i = \frac{K_i \cdot S_i}{\sum_H K_i \cdot S_i} \cdot 100, \quad (3.23)$$

де C_i – концентрація компонента в дослідній суміші;

S_i^{kat} - площа піку кривої катарометра i -го компонента;

K_i - коефіцієнт чутливості катарометра для i -ї молекули газу.

Ці коефіцієнти площам піків, які реєструються при проходженні однакової кількості газової проби різних молекулярних форм [91], та дорівнюють :

$$K_H/K_N/K_{CO}/K_{CO_2}/K_{H_2S}/K_{CH_4}/K_{C_nH_m} = 2.02/0.98/0.98/1.34/1.37/1.42/1.5.$$

Компоненти іонізаційної камери визначаються по наявності 2 піків: $0 \dots 1 = CH/CH_1$, де вагові коефіцієнти чутливості газової проби дорівнюють $K_{CH}/K_{CH_1} = 0,64/0,85$. Тоді концентрації i -го компонента іонізаційного детектора визначаються з формули:

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

де $K_i = M_i / \sum C_i$, M_i – молекулярна маса компонента;

$\sum C_i$ – число вуглецю в молекулі даного компонента.

В результаті, по експериментальним даним вихід 10% летючих відповідає умовній температурі 220 °С. Цій температурі відповідає вихід летючих продуктів представлених в таблиці 5:

Таблиця 3.5 – 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

Звідси знайдемо склад дослідного газу з рівняння:

$$V_i = 10r_i$$

Результат представлений в таблиці

Таблиця 3.6 – 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

3.4 Аналіз результатів експериментів характеристик дослідного газу.

На рис. 3.12 та 3.13 представлені експериментальні результати дослідження складу газу при піролізі. Експеримент проводився з зразком масою 200 г в середовищі азоту з темпом нагрівання близько $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Сировина містилося в спеціально сконструйовану камеру із зовнішнім обігрівом. Відбір газу проводився з нижньої частини камери. Криві складу газу від температури отримані шляхом дослідження декількох проб за допомогою хроматографа. Експериментальні криві практично співпадають з розрахунковими даними, а також з результатами робіт інших авторів []. Наприклад, для піролізу біомаси характерно збільшення частки водню і монооксиду вуглецю зі збільшенням температури в камері, а також зростання частки газової складової в зоні високих температур. При цьому максимальний обсяг газу, що виділився склав $0,6\text{ м}^3$ на кілограм вихідної деревини, що в 1,5 рази менше розрахункових даних за умови термодинамічної рівноваги. Це обумовлюється як похибками вимірювального обладнання, так і низькою ефективністю прогріву засипки, тобто невисокою часткою переробленого палива. Отже, з ростом температури частка горючого складової в продуктах піролізу зростає, а величина вуглецю, не перейшов у газоподібну фазу, падає. У той же час підвищення температури призводить до більш високих витрат на установку з економічної точки зору. Тому є необхідністю оцінювати залежність продуктів піролізу в конкретному випадку, тобто при яких температурах відбувається термічне розкладання компонентів.

Згідно графічних залежностей сумарного виходу та складу летючих компонентів газу, спостерігається збільшення метану на 0,6% приблизно через 170 секунд при зростанні температури до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

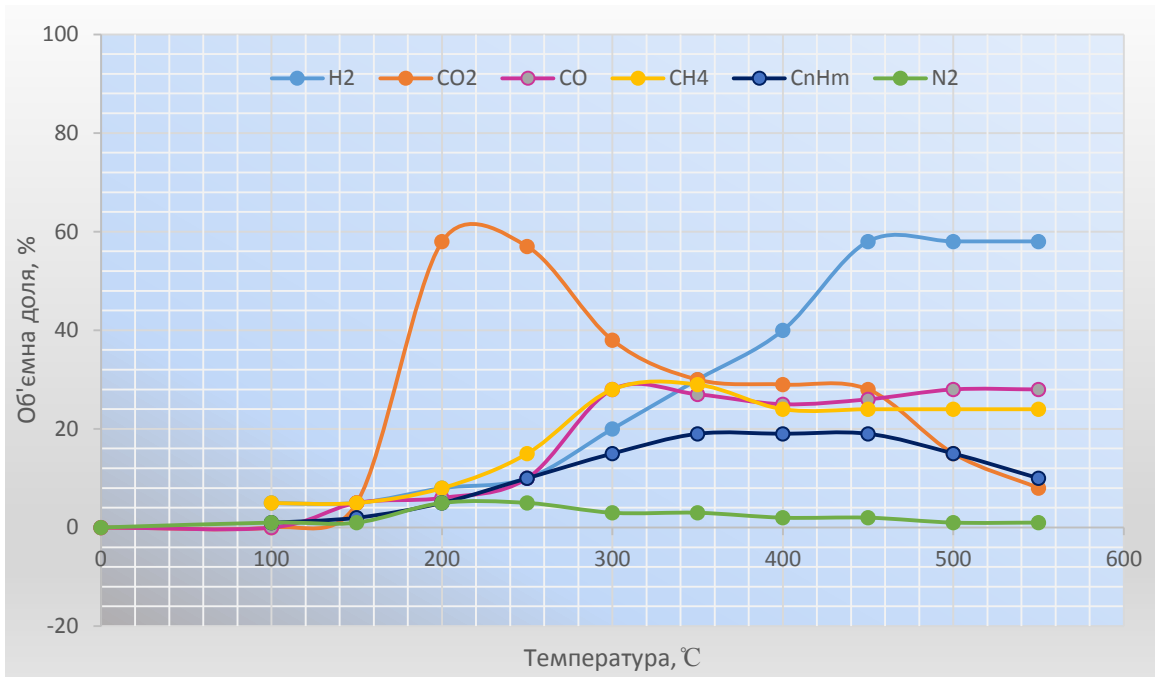


Рисунок 3.12 – Залежність продуктів піролізу від температури (експериментальні дані)

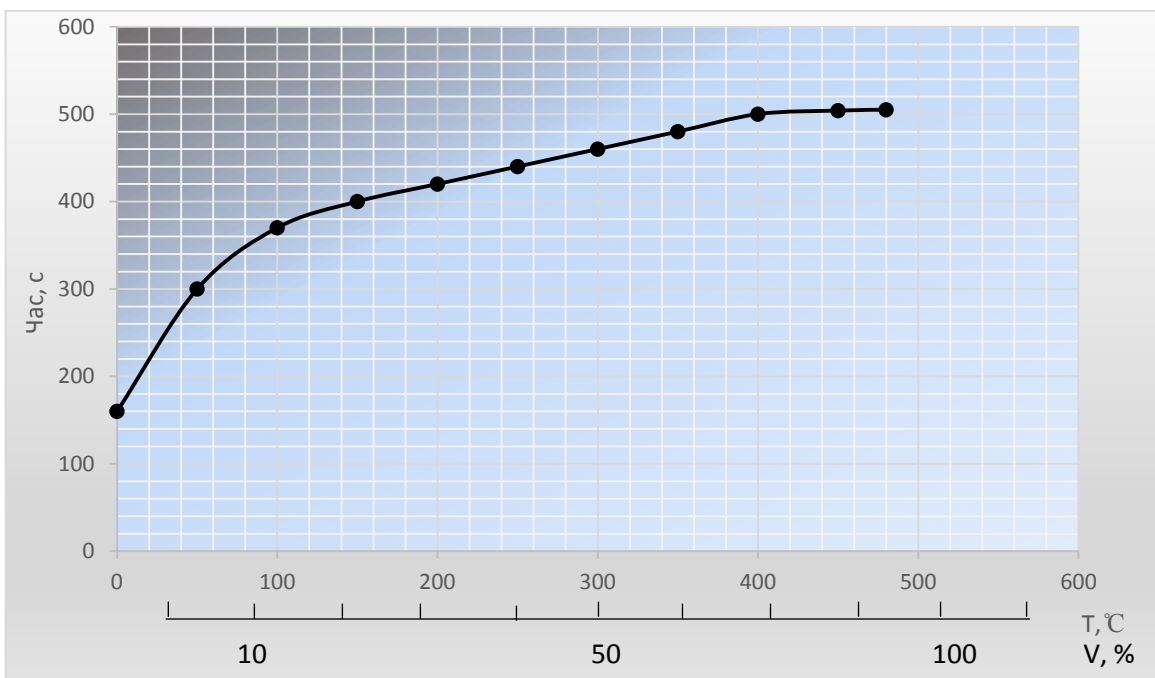


Рисунок 3.13 – Сумарний вихід летючих компонентів отриманого газу

В діапазоні 400-540 °C спостерігається різкий скачок виділення водню до 22 % від сумарного виходу. Отже, це призводить до збільшення об'єму газу в 1,5 рази при умові подальшого нагрівання палива. Слід зазначити, що на процес горіння палива такі параметри дадуть позитивний результат зокрема з меншою втратою тепла та температурою займання дослідної проби газу до 520 °C. Також, як видно з графіку, спостерігається збільшення вуглекислого газу в

діапазоні 150-250 °С, та з подальшим збільшенням температури, починаючи з 260 °С вміст CO_2 починає зменшуватись. Це може бути пов'язане з тим, що при збільшенні температури протікає реакція $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. Аналізуючи загальний вміст горючих компонентів, можна зробити висновок, що в діапазоні від 280-500 °С спостерігається найбільше їх виділення. Тому для отримання більш калорійного газу необхідно підтримувати температуру до 500 °С. Також при даній температурі значно зменшується виділення CO_2 та азоту, небажаних домішок в паливному газі.

Аналізуючи отримані дані, з ростом температури, об'єм піролізного газу в паливній суміші, збільшується, що пов'язано, зі значно повним термічним розкладанням частинок біомаси. Якщо виконати порівняння з повним об'ємом паливної суміші при температурі 220 °С, то об'єм газу при відповідних температурах 275, 325, 385 та 518 буде збільшуватись в 1,2; 1,295; 1,611 та 1,81 разів. Слід зазначити, що вміст вуглеводнів також зростає при досягненні температури 518 °С та досягає максимуму. При цьому перевищується це значення, якщо порівняти з 220 °С в 2,3 рази.

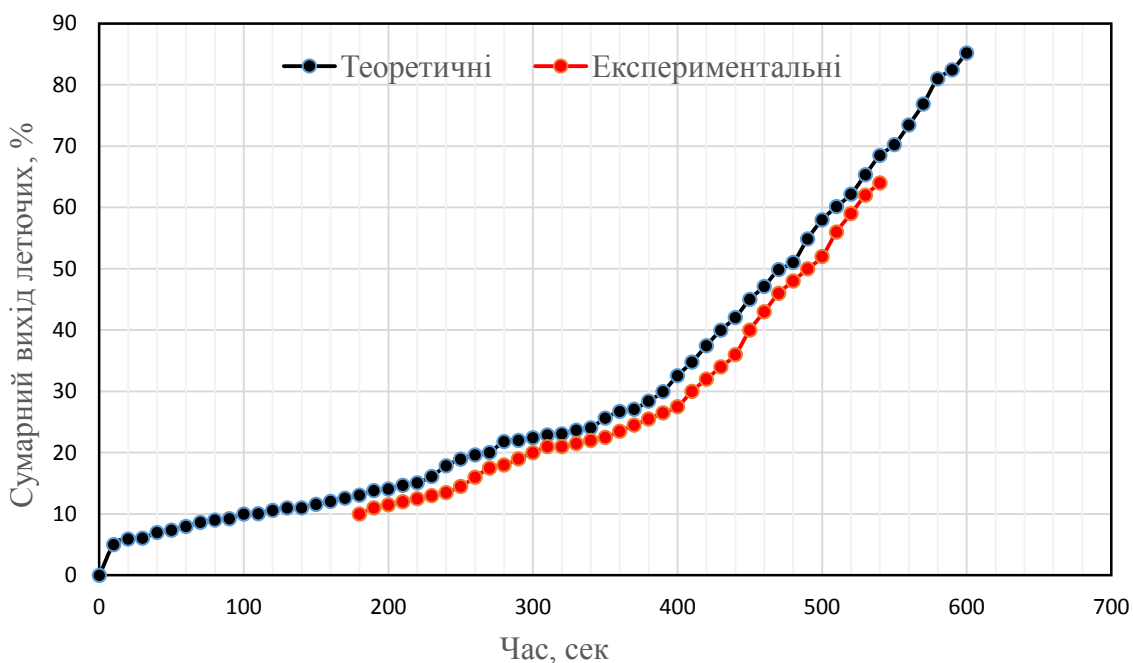


Рисунок 3.14 – Порівняння експериментальних та теоретичних даних сумарного виходу компонентів продуктів термічного розкладання частинок біомаси

На рисунку 3.14 представлені розрахункові та експериментальні залежності сумарного виходу летючих компонентів в межах температур від 200°C до 540°C. Вимірювання фіксувались кожні 25°C/сек, розрахунки проводились також з шагом 25°C/сек.

Отримані експериментальні та теоретичні дані по динаміці термічного розкладання біомаси в умовах нагріву відображають складну залежність виходу індивідуальних компонентів сумарного газу як від часу, так і від температури протікання процесу. При цьому характер відповідних закономірностей різний для кожного з компонентів. Але слід зазначити, що експериментальні дані відрізняються від теоретичних приблизно на 5%, що дає можливість використовувати методику розрахунку для визначення сумарного виходу летючих компонентів для різних видів біомаси і в різний проміжок часу та відповідних температурах.

3.4.1 Аналіз результатів експериментів теплоти згоряння дослідного газу

Крім складу газу, в процедурі досліджень визначається теплота згоряння палива. Для визначення продуктів піролізу та теплотворної здатності вихідними величинами були елементний склад зразку (табл. в розділі 2), температура та тиск в експериментальній установці. Результати представлені в таблиці 3.7 та рисунку 3.15.

Згідно експериментальних даних, теплота згоряння палива збільшується від 14,23 МДж/кг до 19,46 МДж/кг. Це свідчить, що відбір газу для повторної подачі його в камеру піролізу збільшує його теплотворну здатність. Слід зазначити, що починаючи з 300°C до 525°C збільшується не тільки теплота, але й об'єм самого газу від 1,03 м³/кг до 1,52 м³/кг.

Таблиця 3.7 - Результати вимірювань при різних режимах роботи установки

Температура, °C	100	200	300	400	500
CO ₂ , %	0	51	29	20	10
CO, %	5	28	26	28	30
CH ₄ , %	6	5	16	20	24
C _n H _m , %	0	6	16	18	18
H ₂ , %	0	8	12	16	18
N ₂ , %	0	2	1	1	0
Частка твердого осаду, %	5,89	5,89	15,74	15,36	14,98
Масова доля газу, %	7,36	7,25	75,2	87,31	87,31
Маса газу, кг/кг	0,77	0,77	0,77	0,8	0,8
Густина газу, кг/м ³	0,75	0,7	0,65	0,61	0,59
Q _{газ} , МДж/кг	13,5	13,57	14,01	14,23	14,23
V _{газ} , м ³	1,03	1,03	1,11	1,49	1,52
Q _{10%} , МДж/кг	5,03	5,03	5,03	5,03	5,23
Q _{сум.} МДж/кг	18,53	18,6	19,04	19,26	19,46

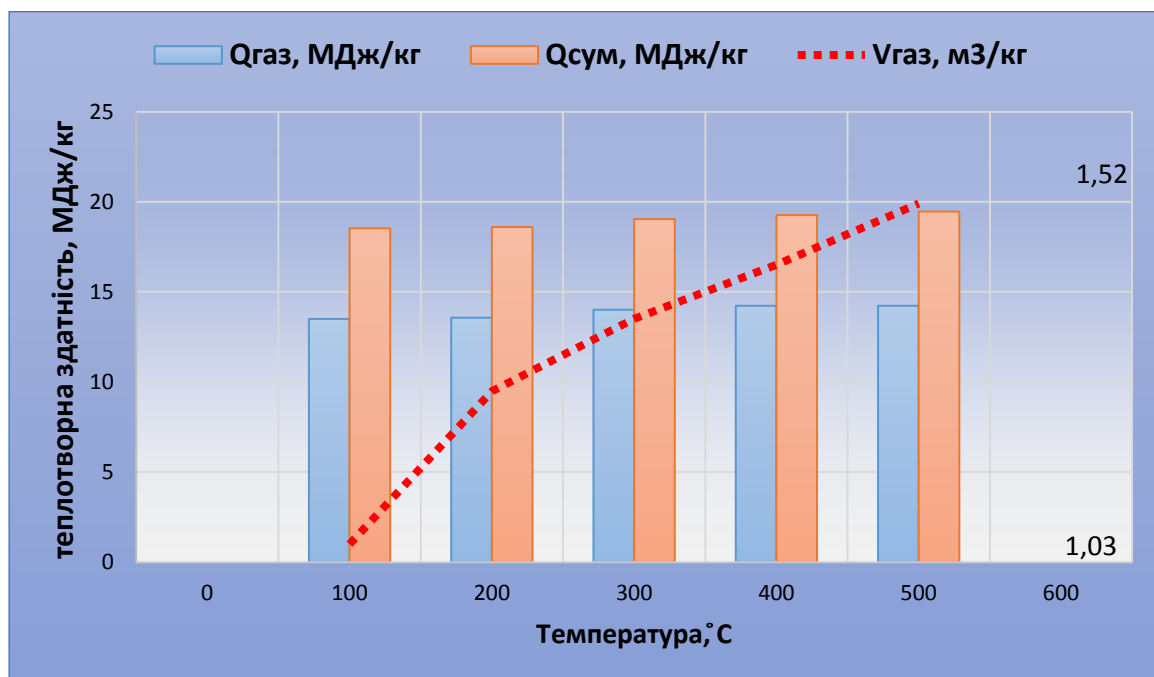


Рисунок 3.15 - Залежність теплоти згорання та об'єму газу від температури

3.4.2 Аналіз результатів експериментів впливу параметрів на склад газу

З кожним видом палива були проведені по три експерименти пуску з повітрям. В одному запуску фіксувались декілька режимів, які відрізнялись витратою повітря. Між собою запуски відрізнялись температурою повітря та тиском в установці. Загальна кількість експериментальних режимів склала 27. Коефіцієнт витрати повітря оцінювався як відношення фактичної витрати повітря $V_{\text{пов}}$ до кількості повітря теоретично необхідного для повного згорання палива $V_{\text{пов.палива}}$:

$$\alpha = \frac{V_{\text{пов}}}{V_{\text{пов.палива}}} \quad (3.24)$$

Значення кількості повітря теоретично необхідного для повного згорання палива знаходиться з рівняння:

$$V_{\text{пов.палива}} = 0,0889(C + 0,375S) + 0,265H - 0,0333O, \text{ м}^3/\text{кг}$$

На рис. 3.16 -3.17 представлені залежності складу палива від витрати повітря, а також від температури та тиску в дослідній камері. Після ряду експериментів були визначені оптимальні значення відповідні температурі 490 °С, тиску 10 атм та витрати повітря 1,7 кг/кг для біомаси та витрати пари 0,5 кг/кг, яка при цьому утворилась.

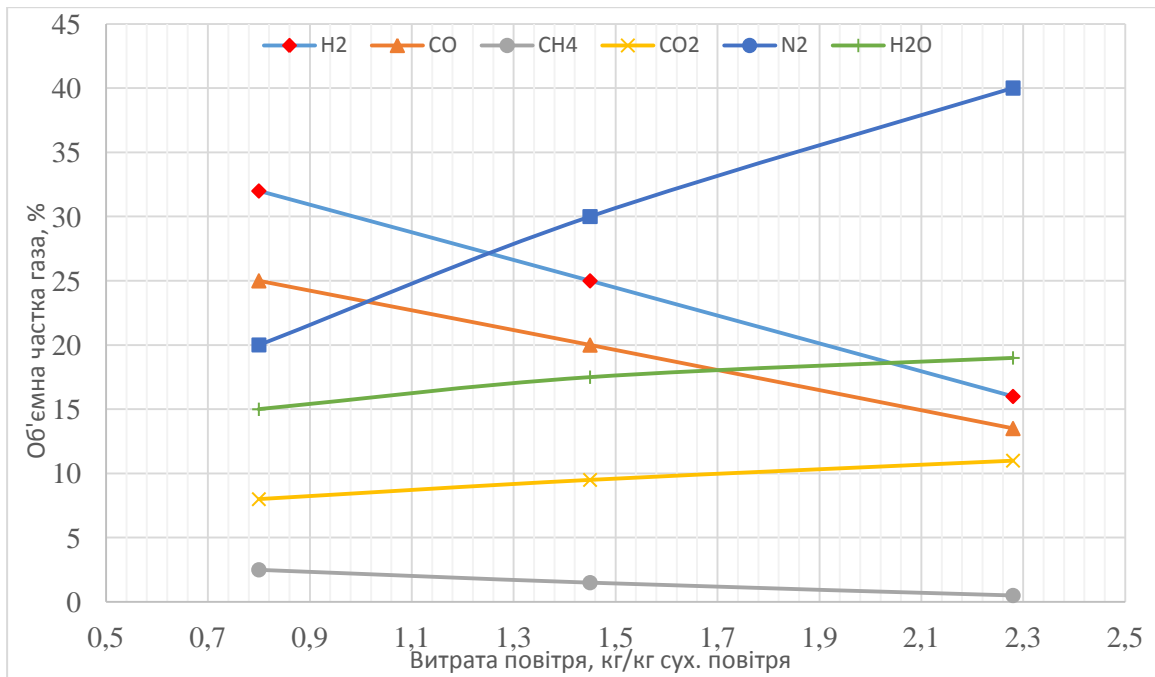


Рисунок 3.16 – Склад газу в залежності від витрати повітря

Як видно, витрати повітря значно впливає на склад паливного газу. Об'ємна частка горючих газів H₂, CH₄, CO, C_n H_m знижується 2,5; 5,5; 3,5 разів відповідно з витратою повітря в діапазоні від 0,9 до 2,4 кг/кг біомаси. При цьому вміст H₂O збільшується до 8%. Також, слід зазначити зменшення теплоти згоряння на 26 %, при збільшенні в 1,5 раз подачі повітря в камеру піролізу.

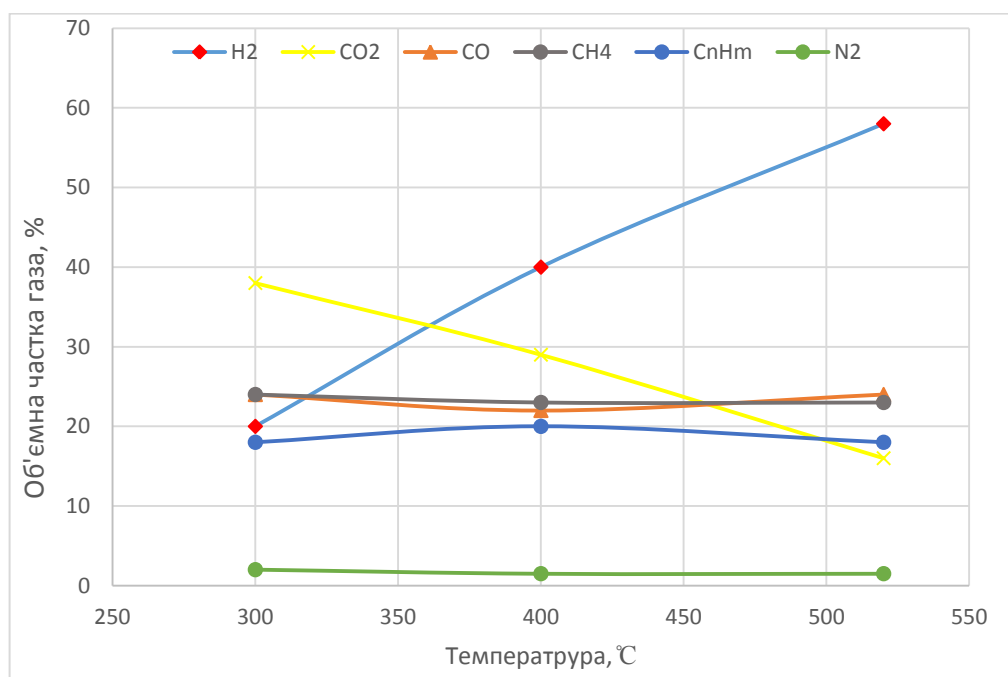


Рисунок 3.17 – Концентрація компонентів газу в оптимальному діапазоні температур

На рис. 3.18 представлені характеристики залежності складу газу та тиску в камері.

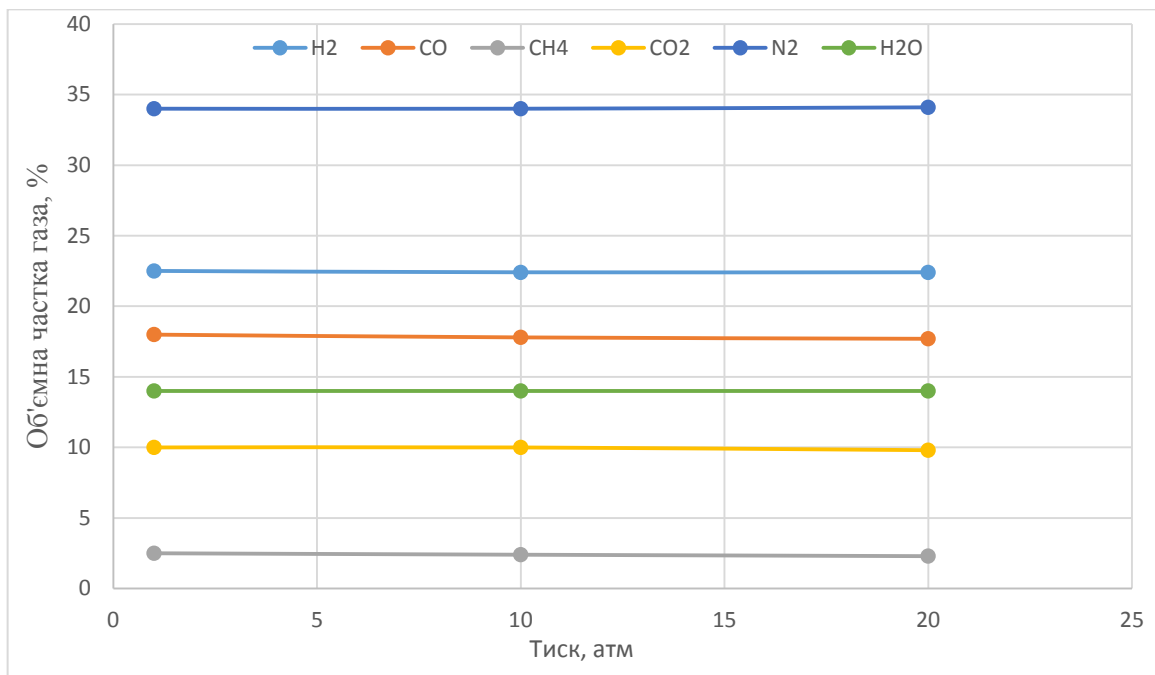


Рисунок 3.18 – Склад газу в залежності від тиску в камері

Згідно дослідних випробувань відзначимо, що температура впливає на склад компонентів газів. З ростом температури спостерігається помітне збільшення часток горючих компонентів, водню та CO. При цьому, вміст метану зменшується, але незначно. Також, слід зазначити, що об'єм газу та теплота згоряння зростають.

Згідно графічних залежностей (рис. 3.15-3.18) тиск в камері виявляє значно менший вплив ніж температура. Із збільшенням тиску збільшуються баластні показники: азот, вуглекислий газ, пара води. Також зростає доля метану, але знижується водень та CO, що призводить до зниження теплоти згоряння. Не зважаючи на все це, слід зазначити, що збільшення номінального тиску в камері призводить до зменшення конструкції установки, та як наслідок здешевлення всього агрегату.

Однак при збільшенні температури зростає об'єм газової суміші, віднесений до маси початкового зразка, також зменшення частки парів води та величини твердого осаду. У зв'язку з цим, зростає теплотворна здатність піролізного газу на масу вихідної сировини, максимум цієї кривої досягається в

діапазоні температур 310 – 540 °С. Відповідно, дана ділянка являється найбільш сприятливим з точки зору експериментів, які проводились при однакових режимах: з тиском 1 атм та швидкістю нагріву 25 °С /сек.

Газові складові мають схожий характер при зіставленні розрахункового та експериментально складу газу. Криві метану та водню мають задовільну якісну подобу. В інтервалі температур 300 – 540 °С відмінність даних складає не більше 5 %. Кількість СО в експерименті більше на 2-3%, чим розрахунках, при цьому для інших компонентів, у яких переважаючим є вуглець (С), спостерігається зворотне відношення.

Висновки

1. Для визначення процесу піролізу рослинних відходів була створена експериментальна установка. Були проведені експериментальні дослідження по визначенню параметрів процесу, який протікає в зонах піролізу: тривалість процесу, кінетична температура шару, витрати біомаси.

2. Проводились вимірювання вологості біомаси (тирса, шкарлупа горіха, лушпиння сояшника) з вмістом волого 5 – 45 %. Отже, енергоємність процесу звісно залежить від зниження вологості сировини. Тому є доцільним узгодження в піролізній установці режими нагріву або сушіння біомаси та перехід до самого процесу розкладання часток.

3. Склад летючих компонентів продуктів піролізу визначали методом газової хроматографії.

4. Згідно графічних залежностей сумарного виходу та складу летючих компонентів газу, спостерігається збільшення метану на 0,6% приблизно через 170 секунд при зростанні температури до 350 °С. В діапазоні 400-540 °С спостерігається різкий скачок виділення водню до 22 % від сумарного виходу. Отже, це призводить до збільшення об'єму газу в 1,5 рази при умові подальшого нагрівання палива.

5. Слід зазначити, що експериментальні дані відрізняються від теоретичних приблизно на 5%, що дає можливість використовувати методіку розрахунку для визначення сумарного виходу летючих компонентів для різних видів біомаси і в різний проміжок часу та відповідних температурах.

6. Згідно експериментальних даних, теплота згоряння палива збільшується від 14,23 МДж/кг до 19,46 МДж/кг. Це свідчить, що відбір газу для повторної подачі його в камеру піролізу збільшує його теплотворну здатність. Слід зазначити, що починаючи з 300 °С до 525 °С збільшується не тільки теплота, але й об'єм самого газу від 1,03 м³/кг до 1,52 м³/кг.

7. Тиск в камері виявляє значно менший вплив ніж температура. Із збільшенням тиску збільшуються баластні показники: азот, вуглекислий газ, пара води. При збільшенні температури зростає об'єм газової суміші, віднесений до маси початкового зразка. У зв'язку з цим, зростає теплотворна здатність піролізного газу на масу вихідної сировини, максимум цієї кривої досягається в діапазоні температур 310 – 540 °С. Відповідно, дана ділянка являється найбільш сприятливим з точки зору експериментів, які проводились при однакових режимах: з тиском 1 атм та швидкістю нагріву 25 °С /сек.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Організація охорони праці на підприємстві

Відповідальність за стан охорони праці на підприємстві несе директор та головний інженер.

Відповідальність за стан охорони праці в рослинництві покладається наказом директора на головного агронома, якщо фахівця з охорони праці на підприємстві немає, то його функції за суміцництвом виконує головний інженер, або його заступник згідно зі штатним розкладом.

На підприємстві є спеціальна служба безпеки в складі відділу та згідно з типовим положенням стосовно вивчення та перевірку знань охорони праці встановлюється порядок навчання всіх робітників по питанням з охорони праці.

Проводяться наступні організаційні питання з охорони праці:

В організації робіт з техніки безпеки на об'єктах з газовим обладнанням полягає в призначенні відповідальних осіб, а саме виробників робіт, начальників ділянок, бригадирів-монтажників; включення в здійснення проекту роботи для складання сприятливих умов для безпечного виконання робіт; санітарно-гігієнічне обслуговування працівників; по достаньому освітленню робочого місця та газового і електричного обладнання; впровадження досліду попередження виробничого травматизму; виконати перед початком роботи впровадження інструкції по безпечним методам праці на робочих місцях, також організація безпечних робочих місць.

При необхідності виконання монтажу електричного обладнання керівник робочих ділянок розробляє заходи із забезпеченням безпечного виробництва праці та безпечність працівників, тому що для монтажників-електриків з'являється небезпека з боку виробничого обладнання та діючих установок.

Наглядна агітація на ділянці представлена плакатами та табличками, але деякі з них потребують оновлення. Кабінету з охорони праці немає, але існують куточки з охорони праці, які постійно оновлюються.

Стан промислової санітарії задовільний. Працюючі забезпечені переодягальнями, спецодягом, душовими кімнатами та миючими засобами.

Фінансування всіх заходів по охороні праці проводиться за рахунок господарства. Працівники не несуть ніяких матеріальних витрат на заходи з охорони праці.

Уся робота з охорони праці в сільському господарстві проводиться відповідно до «Положення про організацію робіт з охорони праці на підприємствах, в організаціях і установах агропромислового комплексу України».

Вказівки інженера по охороні праці зобов'язані виконувати усі фахівці і робітники підприємства.

Фахівець (Інженер) по охороні праці має право:

- забороняти роботу на тракторах, комбайнах, верстатах, апаратах і механізмах, а також припиняти виробничу, будівельну, вантажно-розвантажувальні та інші роботи, якщо з'явилася загроза життю або здоров'ю працюючих і загроза виникнення аварії або пожежі, із негайним повідомленням про це рішення керівництва підприємства або керівника виробничої ділянки;
- відстороняти від роботи осіб, що грубо порушують правила й інструкції з безпеки праці, виробничої санітарії і пожежної охорони, із доведенням до відома про це керівництва підприємства або керівника виробничої ділянки;
- порушувати клопотання перед керівництвом підприємства про заохочення за дисциплінованість або залучення до відповідальності порушників правил, інструкцій і норм по охороні праці.

4.2. Вимоги безпеки праці при роботі з газовими установками для опалення приміщень.

4.2.1. Загальні положення.

В сільському господарстві, також і в промисловості може застосовуватись як природній, так і штучний газ. Це призводить до виконання відповідних правил та норм безпеки. Газове обладнання потребує підвищеної безпеки. Тому газові роботи виконуються відповідною бригадою не менше двох працівників.

Введення в експлуатацію систем газопостачання населених пунктів, громадських будинків, промислових та сільськогосподарських підприємств котельень, підприємств комунально-побутового обслуговування населення виробничого характеру дозволяється за наявності акта прийняття об'єкта, технологічних схем систем і об'єктів газопостачання, інструкцій і експлуатаційної документації з безпечного користування газом, плану локалізації і ліквідації можливих аварій, документів з навчання і перевірки знань керівників спеціалістів і робітників.

4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком роботи.

Перед пуском газу на об'єкт проводяться вторинні випробування на герметичність газопроводів, проводиться робота установок електричного захисту, перевіряється стан вентиляційних каналів та димоходів, справність, комплектність газової арматури.

Про дату проведення пуску газу підприємство повідомляє СПГГ не пізніше ніж за 5 днів.

Але, так, як на підприємстві газова служба відсутня, пуск газу проводиться спеціалізованою службою СПГГ за договорами, укладеними в установленому порядку.

Забезпечення виконання заходів покладається на власника підприємства.

До обслуговування газового обладнання, газопроводів і газорегуляторних установок допускаються особи віком від 18 років, що пройшли медичний огляд, курс навчання та склали відповідні іспити.

4.2.3 Вимоги безпеки праці в процесі виконання роботи.

При експлуатації систем управління технологічними процесами забезпечується контроль стану тепломеханічного обладнання; захист та управління; надійність та економічність роботи. Прилади автоматичного регулювання, регулюючі, запорні механізми, засоби вимірювання постійно повинні бути в справному стані.

Працівники, які обслуговують систему газового обладнання забезпечують:

- наявністю запасних приладів та матеріалів;
- підтримку всіх систем в випраному вигляді, готовність їх до роботи;
- своєчасно проводитись технічне обслуговування та ремонт;
- виконання заходів зі збільшенням надійності та ефективності використання.

4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях.

Усі дефекти в роботі газових об'єктів усуваються тільки після припинення подачі газу. Місце роботи огорожують і охороняють. Роботи у газонебезпечних місцях повинні виконувати не менше двох робітників за наявності протигазів, а у газових колодязях чи котлованах - ще й за наявності страхового пристрою.

Приміщення в яких знаходиться газове обладнання повинні бути оснащені вогнегасниками, ящиками з піском та щитами пожежної безпеки.

Меблі та обладнання мають розміщуватися таким чином, щоб забезпечувався вільний евакуаційний прохід до дверей виходу з приміщення (завширшки не менше 1 м). Евакуаційні шляхи та виходи необхідно постійно утримувати вільними, нічим не зашарашувати.

В аварійних випадках та , або у разі пожежі терміново:

- повідомити пожежну охорону по телефону **101**, та, або при необхідності викликати аварійну службу газової мережі по телефону **104**, вказати при цьому адресу, кількість поверхів, місце виникнення пожежі, наявність людей, своє прізвище;
- організувати евакуацію людей та матеріальних цінностей;

- повідомити про виникнення пожежі адміністрацію та чергового (за його наявності).
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- розпочати гасіння пожежі наявними первинними засобами пожежогасіння;
- організувати зустріч підрозділів пожежної охорони й надати їм консультаційну та іншу допомогу в процесі гасіння пожежі.

4.2.5 Вимоги безпеки праці по закінченню робіт.

Закінчення робіт з пуску газу фіксується в наряді на газонебезпечні роботи, який повинен бути доданий до виконавчо-технічної документації об'єкта і зберігатися разом з нею.

Відповідальний за протипожежний стан службових приміщень після закінчення роботи зобов'язаний:

- оглянути приміщення, переконатись у відсутності порушень, що можуть призвести до пожежі;
- вимкнути освітлення електроживлення приладів та обладнання (за винятком електрообладнання, яке за вимогами технології повинно працювати).

ВИСНОВКИ

Для покращення стану безпеки праці необхідно звернути увагу на такі положення:

- обов'язкове вчасне проведення та реєстрація всіх повторних, позапланових та цільових інструктажів;
- забезпечити працівників необхідними засобами індивідуального захисту та спецодягом;
- до роботи допускати лише технічно справні машини та знаряддя, що повністю відповідають вимогам безпеки.
- забезпечити працюючих інструкціями з охорони праці відповідно до виду роботи;
- не дозволяти проводити роботи несправним інструментом.

- своєчасно проводити навчання та проходження перенавчання з охорони праці.

- постійно поновлювати кабінет (ділянка) з охорони праці.

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНОГО ГАЗУ

Для доцільності використання нетрадиційних поновлювальних джерел енергії економічної та екологічної вигоди виконаємо розрахунок можливого використання паливного газу.

Піролізна установка виробляє $V=4 \text{ м}^3/\text{год}$. Для підтримання температури та відповідно збільшення теплової здатності необхідно витратити 10 % виробленого газу.

Таким чином, кількість біогазу, яка буде спрямована на об'єкт тепло споживання становить:

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

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

Враховуючи те, що нижча теплота згоряння $18 \text{ МДж}/\text{м}^3$, визначимо кількість теплоти, що отримаємо при спалюванні газу:

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

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

Перетворимо цю кількість теплової енергії у кВт·год, враховуючи що $1 \text{ кВт} = 3,6 \text{ МДж}$, тоді:

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

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

Якщо розрахувати, що підприємство споживає $W=180 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, що становить 41,6 % від потужності виробленого газу установкою:

$$\varphi = (W/W_6)100 = 41,6 \% \quad (5.5)$$

Потужність виробленого біогазу буде в 2,4 рази більшою, ніж добова потреба господарства в електроенергії:

$$W_6/W = 2,4 \text{ рази.}$$

Економічну ефективність використання поновлювальних джерел енергії, а саме паливного газу з рослинних відходів, замість традиційних джерел енергії визначають по формулі:

$$E_{екон} = 3_m \cdot B - E_{ен} \cdot K + I + E_n \cdot K_{доб} \cdot B, \quad (5.6)$$

Z_m – вартість палива, грн./т;

B – річна економія палива, т;

E_{en} – нормативний коефіцієнт, рівний 0,15;

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

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

I – сумарні експлуатаційні витрати, грн.

А загальному випадку річний економічний ефект від використання НПДЕ слід розраховувати з урахуванням економії витрат на заходи щодо запобігання забруднення навколишнього середовища $E_{екол}$, які необхідні при використанні органічного палива, а також витрати на транспортування, зберігання палива і заробітну платню $E_{соц}$ в порівнянні з традиційним паливом.

У такому разі економічний ефект слід визначити з виразу:

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

Термін окупності використання НПДЕ для системи тепlopостачання визначається за формулою:

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

Варіанти використання НПДЕ для систем тепlopостачання вважаються економічно оправданими, якщо термін окупності менший 5 років.

Визначимо річне виробництво теплової енергії застосовуючи установки виробництва біопалива:

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

де T_{on} – тривалість споживання палива, дні (тривалість можна порівняти наприклад до опалювального сезону);

T – тривалість доби, год.

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

Економія газу визначається за формулою:

$$B = Q_{рiч} / Q_n^p \quad (5.11)$$

$$B = 21176 \text{ м}^3$$

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

Визначимо капітальні затрати на придбання необхідного обладнання для установки і її монтаж. Якщо вартість одного кіловата встановленої потужності установок НПДЕ складає 1600 грн.

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

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

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

На теперішній час вартість 1000 м³ газу становить для виробничо-адміністративних об'єктів становить 6990 грн (<http://poltavagazzbut.com.ua/>). Враховуючи ці дані, визначимо вартість зекономленого природного газу за формулою:

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

$$E_{\text{НПДЕ}} = 148020 \text{ грн}$$

За слідкуючою формулою визначимо термін окупності установки з виробництва паливного газу (біогазу):

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

Отримані результати розрахунків заносимо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 - 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	148020
Економія природного газу	B	м ³	21176
Ціна 1000 м ³	Ц _{пг}	грн	6990
Вартість зекономленого газу	E _{нпде}	грн	119808
Термін окупності	T _{нпде}	міс	9,6

Висновки

1. Визначено для господарства, яке споживає 180 кВт год, відповідно складає 41,6 % від потужності виробленого біогазу, це в свою чергу, в 2,4 рази більше ніж добова потреба в електроенергії.
2. Враховуючи ціни на природний газ, вартість зекономленого газу складає 119808 грн, це є досить вагомий показник для господарства.

3. Термін окупності використання НПДЕ, а саме установки з виробництва паливного газу складає 9,6 місяців.
4. Таким чином, розрахунки підтвердили доцільність використання установки.

ВИСНОВКИ

1. Виконано енергетичний потенціал біомаси: відходи злакових кукурудзи 40,1 млн. т, лузга соняшника – 21 млн.т, солома – 34,3 млн.т, лузга гречки, рису – 6,9 млн. т, енергетичні культури - верба, тополь, рапс, міскантус і т.д.) – 11,5 млрд. м³, щепи, деревинна тирса, шкорлупа горіхів – 6,1 млн. т
2. Виконано аналіз технологій переробки біомаси для отримання біопалива. Поряд з прямим спалюванням і газифікацією, піроліз є ефективним методом термічної переробки рослинної біомаси, що дозволяє отримувати якісне, екологічно безпечне тверде, рідке і газоподібне паливо з практично будь-якою сировиною, що містять органічні компоненти, так як використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє мала кількість забруднювачів.
3. Удосконалено конструкцію експериментальної установки для дослідження процесів термічного розкладання часинок біомаси з метою збагачення паливного газу. Отже, в результаті відбору 10% паливного газу можна підвищити його теплотворну здатність до 19100 кДж/кг. Таким чином, ККД збільшується від 0,779 до 0,91.
4. В роботі пропонується методика розрахунку сумарного виходу та концентрації компонентів піролізного газу, визначення витрат палива та повітря, теплоти згоряння паливного газу з біомаси. Очевидно, що основний вплив на склад продуктів піролізу виявляє температурний рівень процесу та час перебування часток у вже утворених продуктів в піролізній зоні
5. Згідно експериментальних даних, теплота згоряння палива збільшується від 14,23 МДж/кг до 19,46 МДж/кг. Це свідчить, що відбір газу для повторної подачі його в камеру піролізу збільшує його теплотворну здатність. Слід зазначити, що починаючи з 300 °С до 525 °С збільшується не тільки теплота, але й об'єм самого газу від 1,03 м³/кг до 1,52 м³/кг.

6. Тиск в камері виявляє значно менший вплив ніж температура. Із збільшенням тиску збільшуються баластні показники: азот, вуглекислий газ, пара води. При збільшенні температури зростає об'єм газової суміші, віднесений до маси початкового зразка. У зв'язку з цим, зростає теплотворна здатність піролізного газу на масу вихідної сировини, максимум цієї кривої досягається в діапазоні температур 310 – 540 °С. Відповідно, дана ділянка являється найбільш сприятливим з точки зору експериментів, які проводились при однакових режимах: з тиском 1 атм та швидкістю нагріву 25 °С /сек.
7. Слід зазначити, що експериментальні дані відрізняються від теоретичних приблизно на 5%, що дає можливість використовувати методику розрахунку для визначення сумарного виходу летючих компонентів для різних видів біомаси і в різний проміжок часу та відповідних температурах.
8. Враховуючи ціни на природний газ, вартість зекономленого газу складає 119808 грн, це є досить вагомий показник для господарства. Термін окупності використання НПДЕ, а саме установки з виробництва паливного газу складає 9,6 місяців.

Список використаних джерел

1. Золотовська О. Біомаса – енергоресурс сільського господарства /Priority directions of science and technology development. Abstracts of the 3rd International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2020. Pp. 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/>
2. Харитонов М.М. Комплексна екологічна оцінка створення енергетичних плантацій на рекультивованих землях: монографія/ Харитонов М.М., М.Г. Бабенко, Н.В. Мартинова та інш. Дніпро: Ліра, 2021. 192с.
3. Шидловського А.К. Паливно-енергетичний комплекс України в контексті глобальних енергетичних перетворень / А.К Шидловського, Б.С Стогній // Українські енциклопедичні знання. – Київ, 2014. – 468 с.
4. Долинський А.А. Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики/ А.А. Долинський // Вісник НАН України. – 2016. – №10. – С. 24
5. Харазішвіллі Ю.М. Модельний аналіз макроекономічних наслідків підвищення цін на газ в Україні / Ю.М. Харазішвіллі // Статистика України. – 2006. – №3. – С. 51 – 56.
6. Гелетуха Г.Г Анализ основных положений «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года» / Г.Г. Гелетуха, Т.А Железная // Промышленная теплотехника.– 2006. – Т.28, №5. – С. 82 – 92.
7. Шидловський А.К. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття / А.К. Шидловського, М.П. Ковалка // Українські енциклопедичні знання. – Київ, 2011. – 398 с.
8. Майгер Н. Политика формирования энергобаланса Украины / Н. Майгер // Энергетическая політика Украины. – 2009. – №2.
9. Губинский М.В. Частичная замена природного газа в нагревательных печах газом термической переработки биомассы / М.В. Губинский, Ю.В. Шишко, А.Ю. Усенко // Труды научно-технической конференции. – Запорожсталь, 2000. – С. 74 – 75.

10. Губинский М.В. Определение технологических возможностей получения газового топлива путем пиролиза биомассы / М.В. Губинский, Ю.В. Шишко, А.Ю. Усенко // Интегровані технології та енергозбереження. – 2011. – №2. – С. 120 –125.

11. Усенко А.Ю. Определение технологических возможностей реализации процесса окислительного пиролиза мелкодисперсных отходов биомассы / А.Ю. Усенко, А.С. Грек, М.В. Губинский // Интегровані технології та енергозбереження. – 2016. – №2. – С.126 – 130.

12. Губинский М.В. Анализ экологической эффективности процессов основанных на использовании биотоплива / М.В. Губинский, Ю.В. Шишко, А.Ю. Усенко, Д.А. Губинская // «Энергия из биомассы»: сборник научных трудов Первой международной конференции / НАН Украины: Институт технической теплофизики, Научно-технический центр «Биомасса». – Киев, 2002. – С. 27 – 29.

13. Гелетуха Г.Г. Обзор технологий получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Часть II / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – №3. – С. 3 – 11.

14. A.V. Bridgwater. The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation // Fuel. – 1995. – Vol. 74, №5. – P. 631 – 653.

15. Status of the Commercialization of IGT Gasification Technologies / R.M. Carty, B.C. Bryan, F.S. Lau, J.M. Abbasian // Proc/ of EPRI Conf. on New P Гелетуха Г.Г. Обзор технологий сжигания древесины с целью выработки тепла и электроэнергии. Часть 1 / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – №5. – С. 3 – 12.

16. Гелетуха Г.Г. Обзор технологий сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная // Топливо и энергетика. – 2008. – №6. – С. 3 – 11.

17. Suadicani K. Wood Chips for Energy Production. Technology – Environment – Economy./ Suadicani K., Evald A., Jakoben H.H. Trojborg Bogtryk, Aarhus. - 1993. – 47 p.

18. A.V. Bridgwater. Biomass Pyrolysis Technologies / A.V. Bridgwater // Proc. Of the 5th Europ. Bioenergy Conf., Lisbon, Portugal, 9-13 Oct. – 1989. P. 489-496.
19. Churin E. Catalytic Upgrading of Pyrolysis Oils / Churin E., Grang P., Delmon B // Ibid. – P. 616-620/
20. Williams P Aromatic Hydrocarbons in the Catalytic Upgrading of Biomass Pyrolysis Oils in the Presence of Steam / Williams P., Nugranad N. // Proc. of the 10th Europ. Bioenergy Conf., Wurzburg, Germany, 8-11 Jun. – 1998. – CARMEN. – 1998. P.1589-1592.
21. Некрасов В.Г. Проблемы использования биомассы в энергетике / В.Г. Некрасов // Энергетическое строительство. – 1992. – №3. С. 58 – 62.
22. Гелетуха Г.Г. Развитие биоэнергетических технологий в Украине / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железная и др.. //Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – №3. – С 3 – 11.
23. Алехнович А.Н. Совместное факельное сжигание биомасс с углем / А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева // Теплоэнергетика. – 2001.– № 2. – С. 2 – 6.
24. Анискин В.И. Перспективы использования растительных отходов в качестве биотоплив. / В.И. Анискин, А.В. Голубкович // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 60.
25. Анискин В.И. Сжигание растительных отходов в псевдоооженном слое. / В.И. Анискин, А.В. Голубкович, В.И. Сотников // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 49.
26. Белосельский Б.С. Пирогазификация – экономически эффективный и экологически чистый метод подготовки и использования низкосортных топлив на электростанциях. / Б.С. Белосельский, Е.Д. Хмелевская // Теплоэнергетика. – 2004. – № 1. – С. 26.
27. Золотовська О.В. Особливості процесу термічного розкладання часток біомаси / О.В.Золотовська // Вісник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – 2010. – №2.
28. Золотовська О.В. Моделювання тепломасообміну в камері піролізу

/ О.В.Золотовська // Вісник Дніпропетровського Державного аграрного університету. – 2009. – №2. – С. 208–211.

29. Золотовська О.В., Міронов О.С. Вплив технологічних режимів термообробки біомаси на якісний склад піролізного газу / О.В.Золотовська // Вісник Дніпропетровського Державного аграрного університету. – 2010. – №1. – С. 75–80.

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра тракторів і СГМ

ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАЛИВНОЇ УСТАНОВКИ
Демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня “Магістр”

Виконав: студент 2 курсу групи Мг-1-20

Марков Сергій Олександрович

Керівник: к.т.н., доцент

Золотовська Олена Володимирівна

- **Мета і завдання дослідження** полягають в удосконаленні процесу перетворення біомаси рослинного походження в паливний газ з урахуванням його ефективності (теплотворної здатності, екологічності) та наявої сировинної бази.
- **Об'єктом дослідження** є технологія виробництва паливного газу.
- **Предметом дослідження** є режимно-технологічні параметри процесу термічного розкладання біомаси та їх вплив на вихід і властивості отриманих продуктів та енергетичну ефективність паливного газу.
- **Задачі досліджень.** Для досягнення поставленої мети та завдання в роботі були вирішені наступні питання:

 - виконаний аналіз енергетичного використання біомаси з метою скорочення дефіциту традиційних власних паливно-енергетичних ресурсів;
 - виконаний аналіз та уточнення методу визначення обсягів різних видів рослинних відходів сільськогосподарських культур;
 - удосконалення конструкції експериментальної установки для дослідження процесів термічного розкладання частинок біомаси з метою збагачення паливного газу
 - визначено методика моделювання ефективності виробництва газу з підтвердженням прийнятих рішень удосконалення дослідної установки;
 - уточнення експериментальних методів та розрахункових залежностей для визначення складових енергетичних балансів процесу як основи для оцінки його технологічної та енергетичної ефективності;
 - дослідження та обґрунтування основних теплофізичних умов (температури, тиск, вологість, витратні характеристики)
 - визначення економічної ефективності використання установки з виробництва паливного газу.

Аналіз технологій, які мінімізують викиди парникових газів



Енергетичний потенціал рослинної біомаси України

Відходи злакових, кукурудзи
40,1 млн. т



Лузга соняшника
21 млн. т



Солома
34,3 млн. т



Щепа, деревинна тирса, шкорлупа горіхів
6,1 млн. т

БІОМАСА



Лузга гречки, рису,
6,9 млн. т



Енергетичні культури (верба, тополь, рапс міскантус і т.д.) 11,5 млрд. м^3

Класифікація технологій використання біомаси в якості джерела енергії

Термічні процеси переробки біомаси

Газифікація

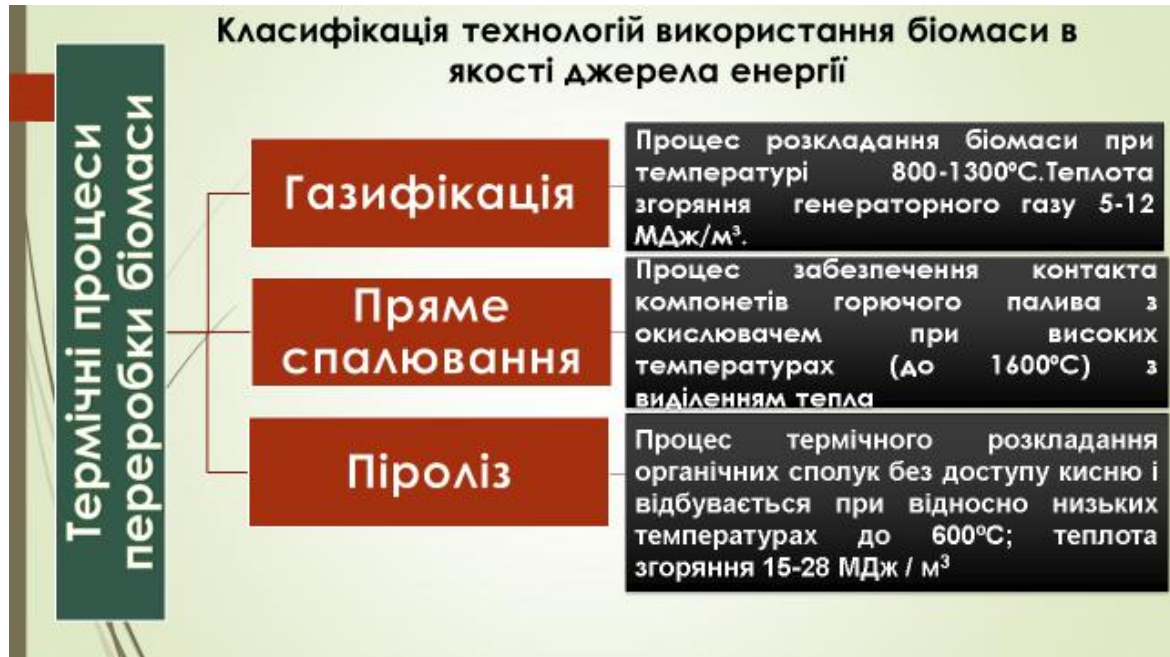
Процес розкладання біомаси при температурі $800-1300^\circ\text{C}$. Теплота згоряння генераторного газу $5-12 \text{ МДж/м}^3$.

Пряме спалювання

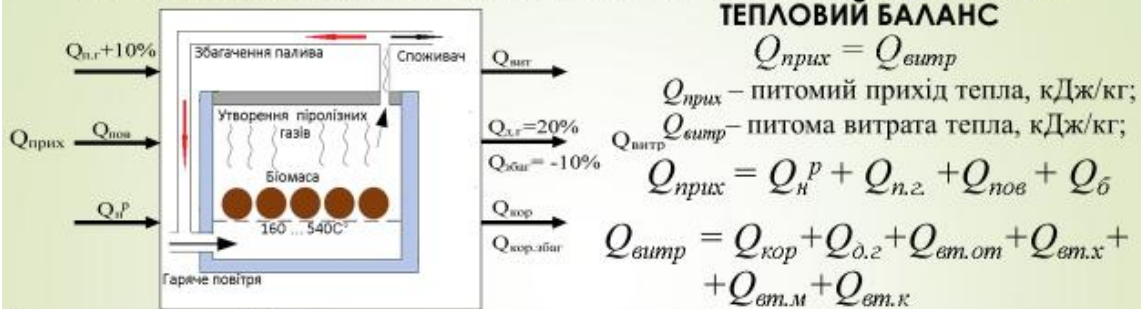
Процес забезпечення контакту компонентів горючого палива з окислювачем при високих температурах (до 1600°C) з виділенням тепла

Піроліз

Процес термічного розкладання органічних сполук без доступу кисню і відбувається при відносно низьких температурах до 600°C ; теплота згоряння $15-28 \text{ МДж/м}^3$



Моделювання режимно-технологічних параметрів ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС

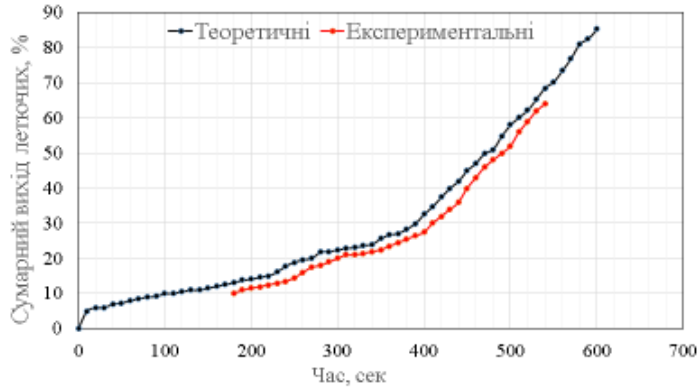


Підведення тепла			Відведення тепла		
Параметр	кДж/кг	%	Параметр	кДж/кг	%
Початкова теплота	Без збаг.	10% збаг.	$Q_{кор}$ корисне тепло від БМ	4995,95	27
Q_N^P нижча теплота згоряння палива	14200	14200	$Q_{д.г}$ витрати тепла з димовими газами	3461,58	13,2
$Q_{п,г}$ теплота піролізного газу	-	1810	$Q_{вт.от}$ витрачене тепло в оточуюче середовище	298	1,6
$Q_{пов}$ теплота повітря	357	-	$Q_{вт}$ тепло без збагачення	10344,47	57
$Q_б$ теплота біомаси	3000	3000			
	17557	19100		19100	100

Моделювання сумарного виходу продуктів термічного розкладання

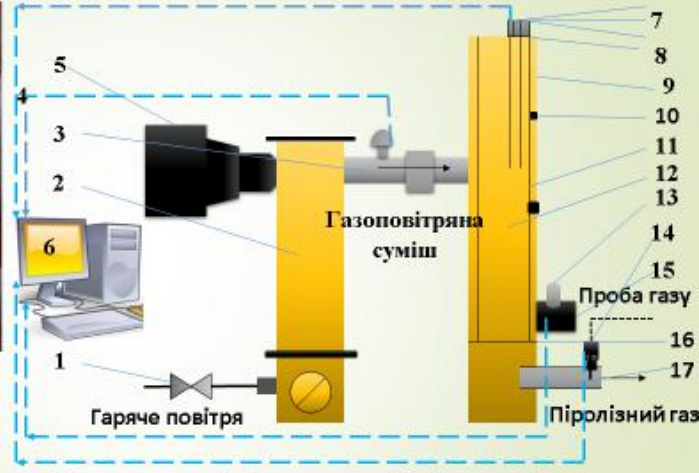
$$V = \sum_{i=1}^n C_{0i} \left(1 - e^{-\int_0^{\tau} r_{0i} e^{\frac{-E_i}{RT(\tau)}} d\tau} \right)$$

$T(\tau)$ – зміна температури біомаси за час.
 b – швидкість підвищення температури, м/с;
 T_0 – початкова температура, °С;
 T – поточна температура, °С;
 R – газова стала, Дж/°С·кг.



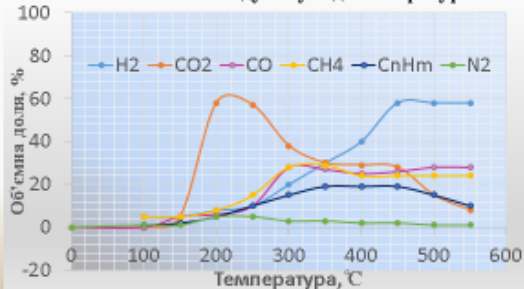
$$\int_0^{\tau} r_{0i} e^{\frac{-E_i}{RT(\tau)}} d\tau = \frac{r_{0i} E_i}{2,303Rb} \left[H\left(\frac{2,303RT}{E_i}\right) - H\left(\frac{2,303RT_0}{E_i}\right) \right]$$

ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

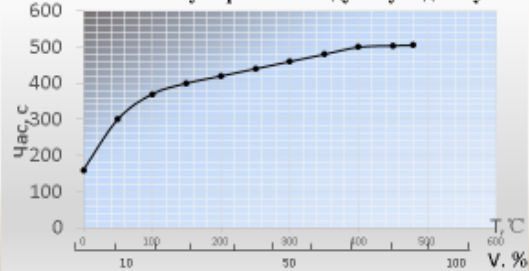


- 1-вентиль для підведення повітря
- 2-камера піролізу (1 стадія-сушка)
- 3-підведення газоповітряної суміші
- 4; 7-гермопари
- 5-бункер завантаження біомаси
- 6-регістрація даних
- 8-кришка 2-ї камери піролізу
- 9-корпус
- 10-спиралеподібна направляюча камери нагріву
- 11-12- друга камера піролізу
- 13,15-патрубки охолодження камер
- 14-пробовідбірник
- 15-Проба газу
- 16-колоосвіць циліндру камери нагріву
- 17-відведення піролізного газу

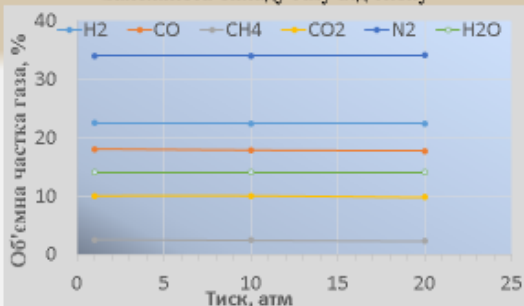
Залежність складу газу від температури



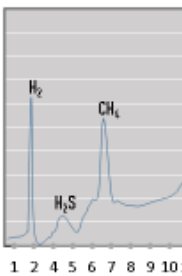
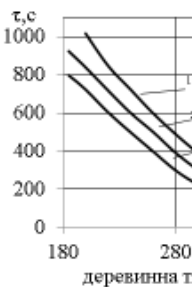
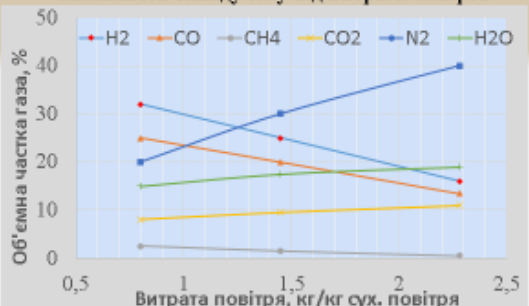
Залежність сумарного виходу газу від часу



Залежність складу газу від тиску

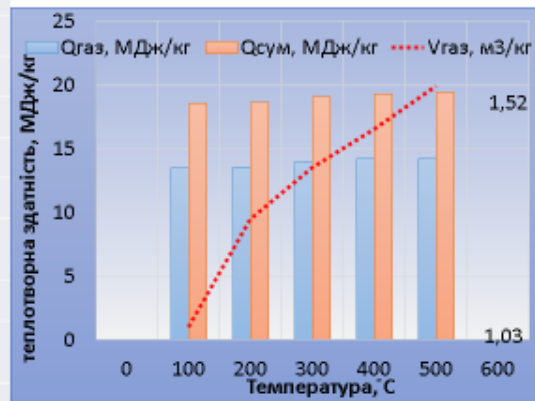


Залежність складу газу від витрати повітря



Залежність теплоти згоряння та об'єму газу від температури

Температура, °C	100	200	300	400	500
CO ₂ , %	0	51	29	20	10
CO, %	5	28	26	28	30
CH ₄ , %	6	5	16	20	24
C _n H _m , %	0	6	16	18	18
H ₂ , %	0	8	12	16	18
N ₂ , %	0	2	1	1	0
Масова доля газу, %	7,36	7,25	75,2	87,31	87,31
Маса газу, кг/кг	0,77	0,77	0,77	0,8	0,8
Q _{газ} , МДж/кг	13,5	13,57	14,01	14,23	14,23
V _{газ} , м ³	1,03	1,03	1,11	1,49	1,52
Q _{10%} , МДж/кг	5,03	5,03	5,03	5,03	5,23
Q _{сум} , МДж/кг	18,53	18,6	19,04	19,26	19,46



Техніко-економічні показники використання установки виробництва паливного газу

Показники	Позначення	Одиниці вимірювання	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 _φ /W	раз	2,4
Річне виробництво теплової енергії установкою	Q _{рпч}	МВт·год	0,2
Тривалість споживання палива, дні (тривалість можна порівняти наприклад до опалювального сезону)	T _{оп}	днів	205
Капіталовкладення	K	грн	148020
Економія природного газу	B	м ³	21176
Ціна 1000 м ³	Ц _ш	грн	6990
Вартість зекономленого газу	E _{нпде}	грн	119808
Термін окупності	T _{нпде}	міс	9,6

Висновки

1. Виконано енергетичний потенціал біомаси: відходи злакових кукурудзи 40,1 млн. т, лузга соняшника – 21 млн.т, соломка – 34,3 млн.т, лузга гречки, рису – 6,9 млн. т, енергетичні культури - верба, тополь, рапс, міскантус і т.д.) – 11,5 млрд. м³, щепи, деревинна тирса, шкорлупа горіхів – 6,1 млн. т
2. Виконано аналіз технологій переробки біомаси для отримання біопалива. Поряд з прямим спалюванням і газифікацією, піроліз є ефективним методом термічної переробки рослинної біомаси, що дозволяє отримувати якісне, екологічно безпечне тверде, рідке і газоподібне паливо з практично будь-якою сировиною, що містять органічні компоненти, так як використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє мала кількість забруднювачів.
3. Удосконалено конструкцію експериментальної установки для дослідження процесів термічного розкладання часинок біомаси з метою збагачення паливного газу. Отже, в результаті відбору 10% паливного газу можна підвищити його теплотворну здатність до 19100 кДж/кг. Таким чином, ККД збільшується від 0,779 до 0,91.
4. В роботі пропонується методика розрахунку сумарного виходу та концентрації компонентів піролізного газу, визначення витрат палива та повітря, теплоти згоряння паливного газу з біомаси. Очевидно, що основний вплив на склад продуктів піролізу виявляє температурний рівень процесу та час перебування часток у вже утворених продуктів в піролізній зоні

Висновки

5. Згідно експериментальних даних, теплота згоряння палива збільшується від 14,23 МДж/кг до 19,46 МДж/кг. Це свідчить, що відбір газу для повторної подачі його в камеру піролізу збільшує його теплотворну здатність. Слід зазначити, що починаючи з 300 °C до 525 °C збільшується не тільки теплота, але й об'єм самого газу від 1,03 м³/кг до 1,52 м³/кг.

6. Тиск в камері виявляє значно менший вплив ніж температура. Із збільшенням тиску збільшуються баластні показники: азот, вуглекислий газ, пара води. При збільшенні температури зростає об'єм газової суміші, віднесений до маси початкового зразка. У зв'язку з цим, зростає теплотворна здатність піролізного газу на масу вихідної сировини, максимум цієї кривої досягається в діапазоні температур 310 – 540 °C. Відповідно, дана ділянка являється найбільш сприятливим з точки зору експериментів, які проводились при однакових режимах: з тиском 1 атм та швидкістю нагріву 25 °C /сек.

7. Слід зазначити, що експериментальні дані відрізняються від теоретичних приблизно на 5%, що дає можливість використовувати методику розрахунку для визначення сумарного виходу лепочих компонентів для різних видів біомаси і в різний проміжок часу та відповідних температурах.

8. Враховуючи ціни на природний газ, вартість зекономленого газу складає 119808 грн, це є досить вагомий показник для господарства. Термін окупності використання НПДБ, а саме установки з виробництва паливного газу складає 9,6 місяців.