

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Рационалізація процесу термічної конверсії рослинних відходів в
установці неперервної дії»**

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

_____ Бублик Олександр Сергійович

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Рецензент: _____

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин
Освітній ступінь: "Магістр"
208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
тракторів і СГМ

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„_____” _____ 2024__ р.

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

Бублик Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи :** Раціоналізація процесу термічної конверсії рослинних відходів в установці неперервної дії

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

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від
“11” 11 2024 року №3769

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

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

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Аналіз існуючих технологій обробки рослинної біомаси. 2. Обґрунтування теоретичних досліджень двустадійної термічної обробки біомаси. 3. Обґрунтування результатів експериментальних досліджень. 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Економічна ефективність використання біогазу. Висновок. Список використаних джерел.

5 Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 18.03.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

_____ (підпис)

Бублик О.С.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотовська О.В.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бублик О.С. Раціоналізація процесу термічної конверсії рослинних відходів в установці неперервної дії / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

В дипломній роботі проаналізовано конструкції установок з переробки рослинної сировини в паливний газ. Визначені перспективне використання запропонованих та порівняльний аналіз існуючих конструкцій. Експериментальний аналіз впливу основних режимних параметрів двостадійного процесу термічної конверсії на питомий вихід газу, вміст смоли та вологи. Реалізація двостадійного процесу термічної конверсії деревної біомаси в газоподібне паливо в безперервної дії. Обґрунтування експлуатаційних характеристик дослідного зразка установки з газопоршневим електроагрегатом та водогрійним котлом на газоподібному паливі, модифікованим для спалювання синтез-газу, отриманого в результаті конверсії деревної біомаси. Проведена економічна оцінка установки.

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ	10
1.1 Основні методи використання деревної біомаси в енергетиці	10
1.1.1 Спалювання	11
1.1.2 Газифікація	11
1.2 Отримання електроенергії з деревної біомаси	20
1.2.1 Використання продуктів прямого спалювання деревної біомаси	20
1.2.2 Використання продуктів газифікації деревної біомаси	22
1.3 Способи очищення і кондиціонування генераторного газу	25
2 ОБРУНТУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДВУСТАДІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ БІОМАСИ	31
2.1 Стенд експериментальної установки	31
2.2 Розробка модуля термічної обробки біомаси в газ	33
2.3 Конструктивний розрахунок модуля	35
2.3.1 Розрахунок об'єму реактора крекінгу модуля термічної обробки	35
3 ОБГРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	42
3.1 Енергетичний баланс	46
3.2 Методи збільшення ККД модуля термічної конверсії	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	58
4.1 Організація охорони праці на підприємствах	58
4.2. Вимоги безпеки праці під час виконання робіт на опалювальних газових установках	59
4.2.1. Загальні положення	59
4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком робіт	60
4.2.3 Вимоги безпеки праці під час виконання робіт	60
4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях	61
4.2.5 Вимоги безпеки праці після завершення робіт	62
5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

Вступ

Оскільки світові запаси нафти і газу продовжують скорочуватися, перехід на відновлювані джерела є одним з найактуальніших економічних і промислових викликів. Рослинна біомаса є перспективною та екологічно безпечною альтернативою відновлюваної енергетики. Водночас, основним викликом для сільського господарства є повна та раціональна утилізація відходів деревообробки. Ці відходи рідко утилізуються, але можуть бути успішно використані як сировина для термохімічних процесів. Одним з перспективних методів переробки рослинної біомаси в процесах термохімічної конверсії є швидкий термічний піроліз. Цей метод піролізу особливо підходить для маломасштабного виробництва завдяки низьким інвестиційним витратам і високій енергоефективності порівняно з іншими процесами перетворення. У процесі піролізу деревних відходів основним продуктом є піролізна рідина (піропаливо), яка має значні переваги перед твердою біомасою, такі як вища енергетична щільність, стабільніший склад при зберіганні та легкість у використанні і транспортуванні. Піропаливо, вироблене за технологією швидкого термічного піролізу, придатне для прямого спалювання в котлах і є альтернативою невідновлюваним видам палива. Однак якість піропалива може бути недостатньою для комерційного використання (переважно двигуни внутрішнього згоряння та газові турбіни).

Деревина була основною біомасою, що традиційно використовувалася протягом століть для опалення та приготування їжі, але незабаром може повсюдно використовуватися для виробництва енергії та хімічної продукції. В середньому деревина містить близько 49% вуглецю, 44% кисню, 6% водню, 0,5% азоту і 0,1% сірки (в сухому вигляді без золи), причому елементний склад деревини різних порід дерев майже ідентичний. Деревна біомаса є відновлюваним енергетичним ресурсом, екологічно чистим паливом і перспективною сировиною для виробництва синтез-газу.

Тому першочерговими завданнями є технологія газифікації піропалива, яка дозволяє отримувати генераторні гази з високою теплотворною здатністю

для використання у виробництві електричної енергії та хімічних продуктів. Таким чином, розроблена комбінована технологія дозволяє переробляти рослинні відходи в піропаливо в місці їх виникнення, агрегувати та транспортувати до централізованого пункту збору для подальшого використання з метою отримання цінних хімічних продуктів та електричної енергії.

Існує шість основних методів переробки біомаси для отримання енергії. Це пряме спалювання для отримання теплової енергії та перетворення її в електричну, наприклад, у паровому енергетичному циклі; анаеробне зброджування для отримання газу, багатого на метан; ферментація для отримання спирту; екстракція олії для отримання біодизеля; піроліз для отримання біо-вугілля, рідкого палива та газів; і газифікація для перетворення сировини до максимального вмісту газу. Ці методи включають різні способи переробки, залежно від специфікацій кінцевого продукту. При переробці лігнін-целюлозної біомаси стратегічну перевагу мають термічні технології та методи целюлозної ферментації, що активно розвиваються [7], тоді як газифікація є однією з найбільш універсальних технологій.

На сьогоднішній день питання газифікації рідких піропалив для отримання висококалорійних газів та швидкого теплопровідного піролізу рослинної біомаси з отриманням рідких продуктів з високою енергетичною щільністю вивчені недостатньо і потребують подальших досліджень і розробок.

Дипломна робота спрямована на дослідження методу двостадійної термічної конверсії деревної біомаси в синтез-газ, вивчення властивостей і визначення сфер можливого застосування одержуваного газу, розроблення та створення установки безперервної дії продуктивністю кілька кілограмів на годину за вихідною сировиною, а також розроблення когенераційного енергетичного комплексу на базі газопоршневого двигуна внутрішнього згорання та опалювальної системи, у якій відбувається часткова заміна рідкого палива газом, що утворюється в результаті перероблення коксівного залишку.

Мета роботи - визначення оптимальних (з точки зору отримання максимального питомого виходу газу та допустимого вмісту смоли) параметрів процесу переробки, обґрунтування установки безперервної термічної конверсії та властивостей отриманого газу, що входить до складу когенераційного енерготехнологічного комплексу опалювальної котельні.

Предмет дослідження – закономірності процесів перетворення з біомаси в паливний газ методом безперервної дії термічної конверсії

Об'єкт дослідження - дослідний зразок установки з газопоршневим електроагрегатом та водогрійним котлом

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні основні завдання:

1. Експериментальний аналіз впливу основних режимних параметрів двостадійного процесу термічної конверсії на питомий вихід газу, вміст смоли та вологи

2. Реалізація двостадійного процесу термічної конверсії деревної біомаси в газоподібне паливо в безперервної дії.

3. Обґрунтування експлуатаційних характеристик дослідного зразка установки з газопоршневим електроагрегатом та водогрійним котлом на газоподібному паливі, модифікованим для спалювання синтез-газу, отриманого в результаті конверсії деревної біомаси.

2. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ

Деревина - найдавніший вид палива. У міру розвитку людської цивілізації її частка в паливному балансі поступово зменшувалася, що було зумовлено низкою об'єктивних причин, найголовнішою з яких є несумірні з можливостями відтворення деревини потреби паливно-енергетичного комплексу. Деревна біомаса являє собою різноманіття органічних речовин, що утворюються в результаті життєдіяльності деревоподібних рослин. З точки зору енергетичного використання серед усього різноманіття видів деревної біомаси найбільше практичне значення мають стовбурова деревина, кора та біомаса елементів крони дерев []. Під час заготівлі та переробки деревини тільки 28% первісної маси дерева перетворюється на пиломатеріали, інша частина стає відходами. Деревна біомаса поновлюється під час життєдіяльності лісових масивів, проте ліс, як природна система, може бути поновлюваним ресурсом тільки в тому разі, якщо методи його управління стійкі та екологічно збалансовані [].

1.1 Основні методи використання деревної біомаси в енергетиці

Використання деревної біомаси в енергетиці має на увазі такі способи перероблення, за яких відбувається цілеспрямоване перетворення біохімічної енергії деревної біомаси на інші види енергії, як правило, теплову, механічну та електричну, а також на хімічну енергію синтетичних палив. Найпоширеніші на сьогодні методи переробки деревної біомаси для використання в енергетиці можна умовно розділити на дві групи: термохімічні та біохімічні. До перших належать спалювання, газифікація та піроліз. До других належать анаеробне зброджування та ферментація.

1.1.1 Спалювання

Найпростішим і найпоширенішим способом отримання теплової енергії з деревної біомаси є її спалювання, що являє собою процес окиснення за надлишку кисню. Теплота згоряння деревини залежить від вологості та зольності, а також частини дерева, що використовується для спалювання. Для стовбурової деревини в перерахунку на сухий беззольний стан нижча теплота згоряння практично постійна і дорівнює 18,9 МДж/кг [10]. Основною метою спалювання є отримання теплової енергії, яка, зокрема, може бути використана для подальшої електрогенерації. Існує безліч різноманітних топкових пристроїв, що відрізняються призначенням, конструкцією, видом і станом палива, що подається, продуктивністю та ефективністю [13, 14].

1.1.2 Газифікація

Термічна газифікація - процес, спрямований на одержання газоподібного енергоносія з органічної частини конденсованого палива, зокрема деревної біомаси, що протікає за рахунок часткового окислення сировини. Основними горючими компонентами газу, одержуваного під час газифікації, є водень і монооксид вуглецю, а також невелика кількість граничних і ненасичених вуглеводнів, головним чином метан. Баластними газами в складі одержуваного газу є азот (при використанні повітряного дуття), діоксид вуглецю і пари води. Крім того, газ містить різні домішки, такі як смоли, тверді частинки вуглистої речовини і золи. Як окислювач використовуються повітря, пара, кисень та їхні суміші. Максимальна температура процесу становить 800 - 1500°C [15].

Газогенераторне обладнання можна класифікувати відповідно до таких основних параметрів: тип окиснювача (кисень, повітря або пара), діапазон робочих температур, спосіб підведення теплоти, величина робочого тиску, а також спосіб подачі біомаси до газогенератора і напрямок переміщення біомаси та потоків теплоносіїв усередині нього.

Використання повітря як дуття є найбільш простою технологією, оскільки не потребує спеціального обладнання для розділення повітря []. Застосування повітря як окислювача призводить до забаластування генераторного газу азотом, високий вміст якого знижує теплоту згоряння газу, а також істотно ускладнює подальшу переробку продукту газифікації в разі його використання для синтезу рідких вуглеводнів. У разі використання повітряного дуття генераторний газ має вищу теплоту згоряння близько 2 - 6 МДж/м³. Газ застосовується для спалювання в котлах, а після очищення - у газових двигунах або турбінах. Отриманий методами повітряної газифікації генераторний газ виявляється непридатним для транспортування трубопроводом через низьку енергетичну щільність. Використання збагаченого киснем повітря або чистого кисню як дуття дає змогу частково або повністю усунути описані вище недоліки, однак призводить до сильного ускладнення технологічного ланцюжка і відповідного подорожчання всього комплексу загалом. Газифікація з використанням кисню дає змогу отримати середньокалорійний газ (10-12 МДж/м³), придатний для обмеженого транспортування трубопроводом і для використання як генераторний газ з метою отримання метанолу, рідких палив та інших хімічних речовин.

До низькотемпературних газогенераторів (до 1000-1100°C) належить більшість наявних газогенераторів малої та середньої продуктивності. Робоча температура високотемпературних газогенераторів зазвичай становить понад 1200°C. За таких високих температур здебільшого працюють реактори газифікації в потоці [], де си ровина повністю перетворюється на газоподібний продукт протягом дуже короткого проміжку часу, що становить лише кілька секунд.

За способом підведення тепла в реакційну зону газогенератори поділяються на автотермічні (за рахунок часткового окиснення біомаси безпосередньо всередині реактора) та алотермічні (за рахунок зовнішнього джерела: під час циркуляції твердого матеріалу-теплоносія, пари тощо).

Газогенератори, що працюють за принципом газифікації під тиском, мають вищу максимальну продуктивність за рахунок швидкого протікання хімічних реакцій. Газ може піддаватися очищенню без попереднього охолодження. Крім того, для подальшого каталітичного синтезу палив не потрібне додаткове стиснення. Тому під час виробництва генераторного газу і водню потрібні значно менші витрати на подальше очищення і підготовку газу [20]. Переваги газифікації під тиском також проявляються під час використання у великих парогазотурбінних установках із внутрішньоцикловою газифікацією біомаси. У цьому випадку не потрібне додаткове стиснення газу перед подачею в камеру згоряння газової турбіни [16]. При робочих тисках вище 25 - 30 бар капітальні та експлуатаційні витрати для даного типу установок сильно збільшуються.

За способом подачі біомаси в газогенератор, напрямком переміщення біомаси і потоків теплоносіїв усередині нього виділяють такі промислово освоєні типи газогенераторів [21, 22]:

- протиточний газогенератор (прямий процес) з нерухомим щільним шаром;
- прямоточний газогенератор (обернений процес) з нерухомим щільним шаром;
- газогенератор із псевдозрідженим киплячим шаром;
- газогенератор із псевдозрідженим циркулюючим шаром;
- газогенератор із двома реакторами з псевдозрідженим циркулюючим і/або киплячим шаром;
- газогенератор газифікації в потоці;
- плазмовий газогенератор.

У протитечійних газогенераторах (рис.1.1) з нерухомим щільним шаром біомасу подають до газогенератора згори, а дуття здійснюють знизу, тож біомаса та гази рухаються усередині реактора в протилежних напрямках. Біомаса, переміщаючись у міру роботи зверху вниз, спочатку просушується гарячим газом, що надходить знизу, а потім піддається піролізу з утворенням

коксового залишку, який рухається вниз і частково окислюється, забезпечуючи підведення необхідної кількості теплоти. Максимальна температура в зоні окислення досягає 1300°C. Пароподібні піролізні продукти частково конденсуються на холодній біомасі, що опускається вниз, а частково виносяться з реактора разом із газом. Зола проходить через колосникову решітку в нижню частину реактора, звідки потім видаляється. У результаті виходить багатий метаном і смолами газ. Концентрація смол у виробленому газі досягає 10-100 г/м³, що обмежує сферу застосування такого газу спалюванням у розташованому поряд з котельною установкою.

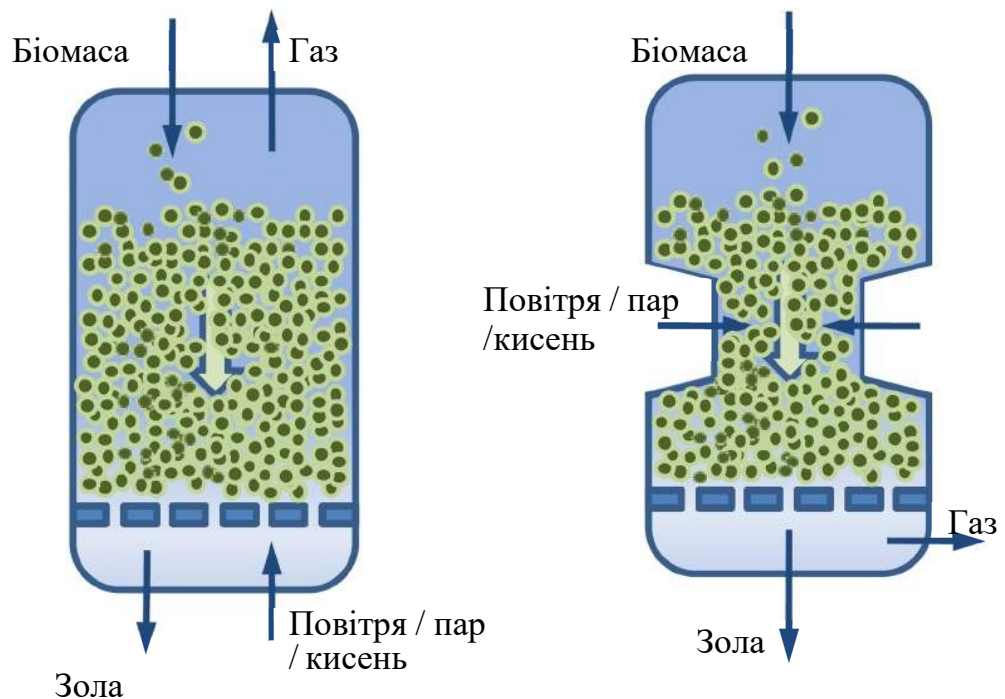


Рисунок 1.1 - Протиточний газогенератор (прямий процес) (а) і прямоточний газогенератор (обернений процес) (б)

Основними перевагами газогенераторів цього типу є високий ступінь конверсії сировини, інтенсивний теплообмін і низька температура вихідного газу, що забезпечує високі показники ефективності. Протитечійні газогенератори можуть працювати з широким діапазоном видів і розмірів вихідної сировини (с/г відходи, тирса тощо), одинична теплова потужність досягає 20 МВт. Серед недоліків процесу можна відзначити можливість

утворення в шарі сировини порожнистих каналів, через які може проникнути значна кількість повітря і призвести до вибуху. Для запобігання подібних ситуацій проводиться рівномірний розподіл сировини за допомогою шурування або постійного руху колосникової решітки [1-5].

У прямоточних газогенераторах (оберненого процесу, рисю 1.1 б) із нерухомим щільним шаром біомасу подають до газогенератора згори, а дуття здійснюють через фурми в середній частині газогенератора, тож біомаса й газ рухаються всередині реактора в одному напрямку. Біомаса послідовно проходить зони сушіння, піролізу, окислення і відновлення. Сушіння і піроліз відбуваються за рахунок тепла, що утворюється в зоні окислення при частковому спалюванні коксового залишку біомаси. У зоні відновлення волога, пароподібні продукти піролізу (частково розклалися в зоні окислення) і продукти окислення біомаси потрапляють у шар розпеченого коксового залишку, де відбувається часткове відновлення CO_2 до CO , а також протікають інші хімічні реакції (переважно ендотермічні). Така технологія дає змогу домогтися дуже низького вмісту смол у генераторному газі, який зазвичай перебуває в межах $50\text{-}500 \text{ мг/м}^3$, що дає змогу його використовувати в газодизельних і газопоршневих електроагрегатах невеликої потужності. Приклади сучасних конструкцій, що використовують принцип прямоочної газифікації, наведено в [6,7].

Різновидом газогенераторів зворотного процесу є газогенератори з поперечним рухом газу, в яких дуття вводиться в нижній частині реактора збоку, а газ відводиться з протилежного боку. Як приклад можна навести автомобільний газогенератор НАТІ-Г-21, а приклад одного із сучасних рішень описано в [28].

Основним недоліком прямоточних газогенераторів є вимогливість до якості та розміру сировини. Наприклад, у разі використання біомаси з низькою насипною густиною виникають проблеми, пов'язані з нерівномірністю розподілу потоку газів і суттєвим падінням тиску. Тому в газогенераторах оберненого процесу використовується тільки фракціонована (тріска) або

брикетована/гранульована деревна біомаса. Порівняно з протиточними, прямоточні газогенератори більш схильні до шлакоутворення. Серед менш значущих недоліків можна відзначити дещо меншу ефективність, зумовлену поганим внутрішнім теплообміном у шарі, знижену теплоту згоряння генераторного газу. Прямоточні газогенератори, як правило, мають теплову потужність не більше 1 - 2 МВт, що зумовлено необхідністю рівномірного підтримання температурних параметрів у всьому перетині установки.

Основна перевага газогенераторів із поперечним рухом газу - можливість роботи в дуже малих масштабах і малий час запуску, що становить лише 5 - 10 хвилин. У сукупності з системою газоочищення (циклон і гарячий фільтр) може використовуватися з невеликими газовими двигунами у складі малих стаціонарних і мобільних когенераційних установок потужністю до 10 кВт. Серед недоліків слід виділити необхідність використання попередньо карбонізованої сировини (наприклад, деревного вугілля) для забезпечення прийняттого рівня вмісту смол у газі, у зв'язку з чим технологія не набула широкого поширення.

У газогенераторі з псевдозрідженим киплячим шаром (рис. 1.2 а) подрібнену біомасу подають збоку, і вона в нижній частині газогенератора змішується з інертним матеріалом-теплоносієм (наприклад, піском). Дуття (зазвичай пароповітряне або парокисневе) подається знизу з такою швидкістю (1-3 м/с), що викликає витання частинок шару, яке зовні нагадує кипіння рідини, що називається псевдозрідженням. Це забезпечує хороший термічний контакт і перемішування частинок біомаси та інертного матеріалу, наслідком яких є високі швидкості процесів тепломасообміну і протікання реакцій, зокрема гетерогенних, за близької до постійної температури шару (ізотермічний шар). Процеси сушіння, піролізу, окислення і відновлення протікають паралельно в усьому об'ємі шару. Вміст смол у генераторному газі становить 2 - 60 г/м³, а нижча теплота згоряння коливається в межах 3,7 - 12,8 МДж/м³ залежно від типу дуття [29]. Максимальна робоча температура процесу, як правило, не перевищує 900°C із зазначених вище причин.

Газогенератори з псевдозрідженим циркулювальним шаром також можуть працювати під високим тиском, що, з одного боку, робить їх набагато складнішими та дорожчими, а з іншого - надає суттєві переваги під час роботи з великими газотурбінними установками.

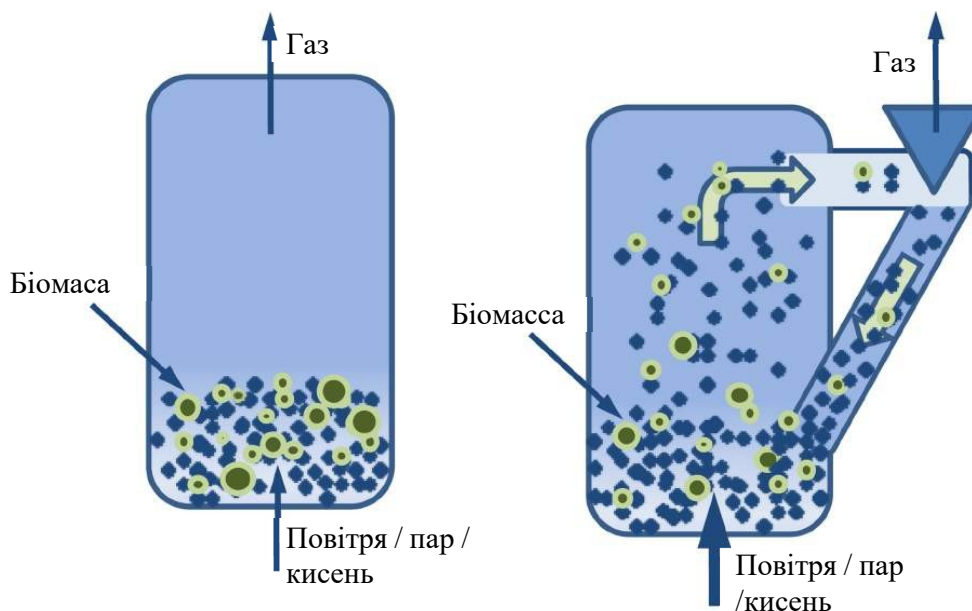


Рисунок 1.2 – Схема газогенератора з псевдозрідженням (а) та циркулюючим (б) шаром

Серед недоліків газогенераторів із псевдозрідженим циркулювальним шаром можна відзначити високу вартість обладнання, наявність температурного градієнта в шарі (порівняно з киплячим шаром), високий вміст твердих частинок у газі, а також сильне абразивне зношення частин реактора, пов'язане з високою швидкістю потоків частинок [31].

У газогенераторі з двома реакторами з псевдозрідженим циркулювальним та/або киплячим шаром (рис 1.3) є два пов'язаних між собою реакційних об'єми, які відповідають за спалювання й газифікацію і, по суті, є топкою і газогенератором. Подрібнена біомаса подається збоку в один із реакторів - газогенератор, де змішується з гарячим інертним матеріалом-теплоносієм (наприклад, піском). Парове дуття подається знизу, утворюючи псевдозріджений киплячий або циркулюючий шар. Утворений за рахунок непрямого нагріву газ відбирається у верхній частині реактора-газогенератора.

Суміш частинок інертного матеріалу і коксового залишку з реактора-газогенератора потрапляє в реактор-топку, в який знизу подається повітря, що створює киплячий або циркулюючий псевдозріджений шар. Частинки коксового залишку згорають, відбувається нагрівання частинок інертного матеріалу. Суміш продуктів згоряння і частинок інертного матеріалу направляють на розділення в циклон, звідки газоподібні продукти згоряння видаляють в атмосферу, а гарячі частинки інертного матеріалу повертають у реактор-газогенератор. Виробляється середньокалорійний газ із вищою тепловою згоряння на рівні 15 - 20 МДж/м³, який містить багато смол, оскільки процес конверсії сировини близький до піролітичного. Максимальна робоча температура становить 900°C, можлива робота під тиском.

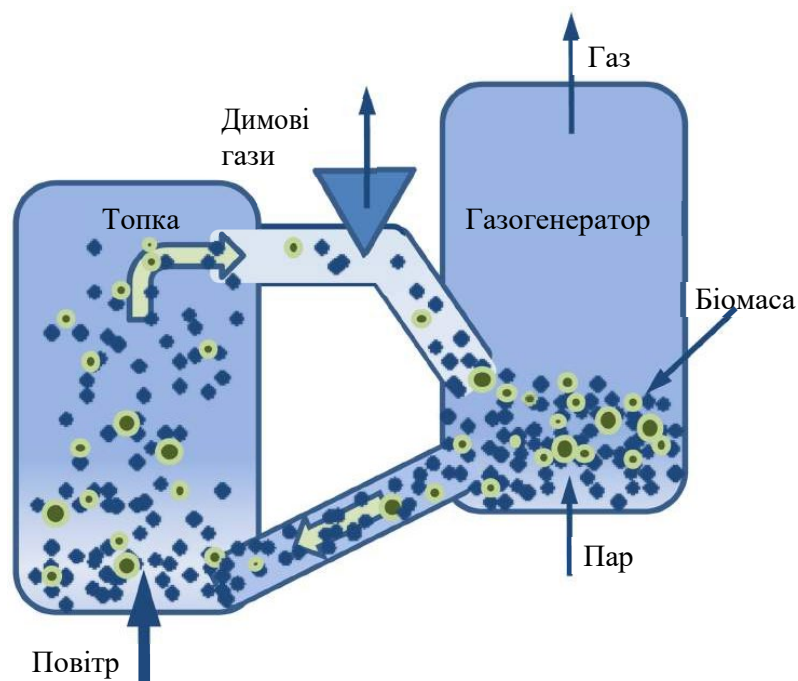


Рисунок 1.3 – Схема газогенератора з двома реакторами (псевдозріджений та циркулюючий)

У газогенераторі, що працює за принципом газифікації в потоці (рис. 1.4 а), ретельно подрібнену до пилоподібного стану біомасу захоплює потік кисневого або парокисневого дуття. Частина біомаси згорає в турбулентному полум'ї у верхній частині газогенератора, при цьому виділяється велика

кількість теплової енергії (температура процесу 1200-1500°C), що витрачається на швидку конверсію біомаси, яка відбувається по всій довжині реактора, у дуже високоякісний синтез-газ. Зола, як правило, плавиться, осідає на стінки газогенератора і потім видаляється у вигляді розплавленого шлаку.

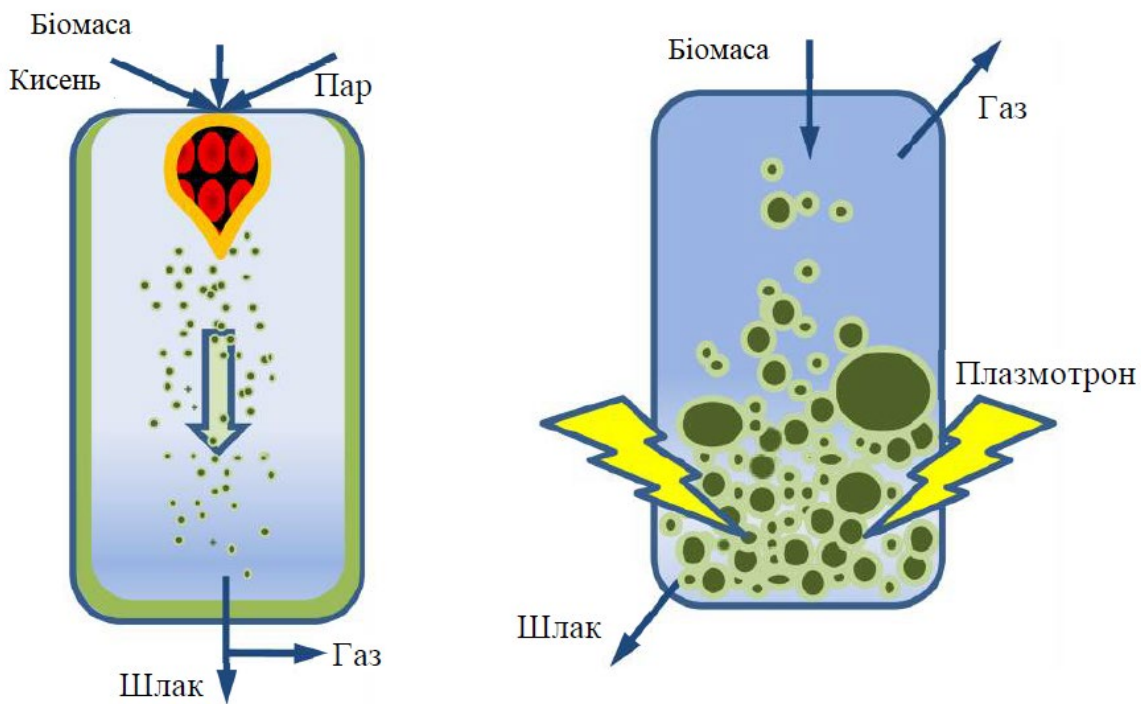


Рисунок 1.4 – Схема газогенератора газифікації в потоці (а) та плазменний газогенератор

У газогенераторі, що працює за принципом плазмової газифікації (рис. 1.4 б), непідготовлену біомасу завантажують у реактор, де вона входить у контакт із потоком гарячої плазми (1500-5000°C), створеної генератором плазми (плазмотроном). Органічна частина біомаси перетворюється на синтез газ дуже високої якості, а мінеральні включення вітрифікуються (оскловуються) на інертний шлак, не схильний до атмосферної ерозії []. Значення розміру, вологості та зольності частинок біомаси можуть перебувати в широкому діапазоні навіть у межах одного завантаження

1.2 Отримання електроенергії з деревної біомаси

Під час виробництва електроенергії шляхом конверсії біомаси в газоподібне паливо для електрогенерувальних установок на базі газопоршневого двигуна внутрішнього згоряння найефективнішим і комерційно життєздатним методом є газифікація []. Конверсія деревної біомаси в газоподібне паливо за допомогою простого піролізу є малоефективним методом []. Таким чином, для подальшого порівняння залишаються два основні способи отримання електроенергії з деревної біомаси. Перший спосіб - перетворення теплоти продуктів згоряння, що утворюються при прямому спалюванні біомаси, в електроенергію. Другий спосіб - використання отриманого методами газифікації або двостадійної піролітичної конверсії газу в газових двигунах, газових турбінах та установках із зовнішнім згорянням, а також для синтезу рідких палив або як сировини для отримання водню, що згодом може бути використане у відповідних електроагрегатах.

Пропонована в роботі конкретна апаратна реалізація принципу безперервної двостадійної термічної конверсії деревної біомаси в синтез-газ може бути ефективною для створення когенераційних установок з одиничною електричною потужністю до 100 кВт. Ця межа зумовлена обмеженнями щодо можливості передачі теплової енергії через стінки реторт, які використовуються в конструкції установки. З огляду на можливість модульного виконання когенераційних електростанцій, далі в огляді особлива увага приділятиметься обладнанню для генерації електроенергії, що має номінальну електричну потужність менше 1000 кВт.

1.2.1 Використання продуктів прямого спалювання деревної біомаси

Для перетворення теплової енергії продуктів згоряння в електроенергію використовуються такі основні типи серійного обладнання:

- парові турбіни;
- парові турбіни з низькокиплячим теплоносієм (цикл Ренкіна);

- парові гвинтові електроагрегати з низькокиплячим теплоносієм;
- парові поршневі двигуни.

Сучасні паротурбінні установки, зокрема малої потужності (до 1000 кВт), є надійними пристроями для виробництва електроенергії, що мають можливість роботи на різних видах палива. Основними недоліками є високі капітальні витрати, висока інерційність парових установок (тривалий час пуску і зупинки) і порівняно низька ефективність.

Парові турбіни з низькокиплячим органічним теплоносієм, що працюють за циклом Ренкіна, здебільшого призначені для утилізації низькопотенційного тепла різних технологічних процесів, тому можуть працювати, використовуючи тепло гарячої води, яку отримують у котлах під час спалювання біомаси. Основна перевага установок цього типу - надійність, зумовлена низькими значеннями робочої температури і тиску. Також до переваг можна віднести компактність установки. Серед недоліків слід вказати високу вартість обладнання та низку проблем, пов'язаних із використанням низькокиплячого теплоносія (токсичність, пожежонебезпека, хімічна нестабільність, висока вартість).

Парогвинтовий електроагрегат складається з компактного парового гвинтового розширювача (аналога турбіни з протитиском) і електрогенератора [7-10]. Парогвинтові електроагрегати мають високі показники надійності, проте мають високу вартість.

Парові поршневі двигуни являють собою одно- або багатоступінчасті машини протитискового типу з системою золотникового розподілу пари. Відрізняються досить високим ресурсом і порівняно невеликою вартістю. Основний недолік - дуже низька ефективність перетворення теплової енергії в електричну.

Варто також відзначити двигуни Стірлінга зовнішнього згорання, робочим тілом у яких зазвичай є повітря, гелій або азот. Під час складання цього огляду не було виявлено інформації щодо наявності серійного комерційного виробництва двигунів Стірлінга для утилізації тепла продуктів

згоряння біомаси, проте в літературних джерелах описано поодинокі дослідні інсталяції.

У табл. 1.1 наведено порівняльні характеристики електроагрегатів різного типу, що використовують як паливо біомасу. У розрахунках приймалося, що ККД котла, що працює на біомасі, для установок потужністю менше 1000 кВт становив 85 % [84].

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики генераторів на біомасі

Тип генератора	Потужність, кВт	Електричний ККД, %
Паротурбінний	235-1000	10-12
	5000-10000	<25
	5000	30-40
Паротурбінний з низькокиплячим теплоносієм (цикл Ренкіна)	От 5-12 до 50-250	8-11
	200-300	10,5-14,9
	600-15000	14,3-16,5(18)
Двигун Стирлінга	30-75	11,9(9,2)-17,5(15)
Паропорневий	10-100-1200	4-7(одноступінчастий)
		8-14 (багатоступінчастий)

1.2.2 Використання продуктів газифікації деревної біомаси

Метод перетворення хімічної енергії генераторного газу дуже сильно залежить від властивостей одержуваного газу, вимог до якості енергії, що виробляється, співвідношення виробництва теплової та електричної енергії, потужності установки, режиму її роботи тощо. Виробництво електроенергії з генераторного газу можливе в газодизельних або газопоршневих електроагрегатах, а також у газових турбінах. Якщо хімічний склад генераторного газу задовольняє умовам, необхідним для синтезу рідких

вуглеводнів, то після ретельного очищення такий газ може застосовуватися для виробництва якісного рідкого моторного палива. Ще одним із можливих способів енергетичного використання генераторного газу є виділення окремих компонентів (H_2 і CO) для використання в паливних елементах. Крім того, для виробництва електроенергії можуть бути використані всі згадані вище пристрої, що перетворюють теплоту продуктів згоряння (у цьому випадку генераторного газу, як холодного очищеного, так і/або гарячого неочищеного). Спалювання газу в пальникових пристроях зазвичай не вимагає спеціальних заходів щодо його попереднього очищення, що збільшує ефективність установки, оскільки не відбувається втрати фізичного тепла генераторного газу, що виходить.

Використання генераторного газу як палива для когенераційних міні-електростанцій на основі газодизельних і газопоршневих двигунів внутрішнього згоряння є зручним та ефективним, що зумовлено такими перевагами електроагрегатів на базі ДВЗ, як відносно невисока вартість, високий електричний ККД, мобільність і невеликі габарити, доступність устаткування та запчастин, а також ремонтпридатність і простота обслуговування. Спеціальні газопоршневі агрегати можуть без істотної втрати потужності працювати на низько- і середньокалорійному генераторному газі. У разі використання газозмішувальної апаратури, налаштованої особливим чином, у газодизельних агрегатах досягається практично повне заміщення дизельного палива генераторним газом при збереженні можливості роботи на рідкому паливі. Загальний недолік схем із двигунами внутрішнього згоряння - наявність високих вимог до чистоти генераторного газу, допустимий вміст смол під час тривалої роботи двигуна не має перевищувати $10-100 \text{ мг/м}^3$ []. У разі недостатнього очищення газу може відбуватися закоксування двигуна, підвищене зношування деталей і передчасний вихід з ладу.

Процес перетворення енергії генераторного газу в турбоустановках (ГТУ і ПГУ) також характеризується високою ефективністю. Незалежно від схеми, позитивною стороною використання газотурбінних установок є висока

експлуатаційна надійність і можливість забезпечення високого ступеня автоматизації.

Використання ГТУ традиційної схеми вимагає застосування спеціальних дотискних компресорів, які споживають значну частину вироблюваної енергії. Крім того, для ефективного спалювання низькокалорійного газу в наявних промислово освоєних ГТУ, що працюють на природному газі, потрібне складне, наукомістке і дороге доведення камери згоряння. Недостатнє очищення генераторного газу може призвести до високих втрат у камері згоряння внаслідок неоптимального процесу або неповного згоряння газу, ерозійного зносу лопаткового апарату та утворення відкладень, які складно видалити, на стінках камери згоряння та лопатках турбін, погіршення температурного режиму їхньої роботи, аеродинамічних і міцнісних характеристик. Наслідком такого негативного впливу може з'явитися підвищений знос робочих елементів камери згоряння і проточної частини турбіни, скорочення ресурсу роботи і зниження показників надійності установки. Допустимий вміст смол у газі, що спрямовується в камеру згоряння ГТУ, становить 0,05 - 0,5 мг/м³ [].

У табл. 1.2 наведено порівняльні характеристики газодизельних, газопоршневих, газотурбінних і парогазотурбінних електроагрегатів.

Тип газогенератора	Потужність, МВт	ККД, %
Паротурбінний внутрішньоцикловою газифікацією	200-1200	>43
Газотурбінний	0,03-0,25	22-30
	1-10	21-31
	10-40	28-37
Газодизельний	0,01-3	23-38
Газопоршневий	<0,1	27-30
	0,3-3	31-36

	>5	36-42
--	----	-------

Також необхідно відзначити один із способів використання газів, що утворюються під час газифікації біомаси, - водню і монооксиду вуглецю - у паливних елементах, електрохімічних пристроях, що перетворюють хімічну енергію палива на електричну і теплову енергію. Паливні елементи здійснюють пряме перетворення енергії палива на електрику, минаючи малоефективні процеси горіння, що йдуть з великими втратами. Вони, з одного боку, вирізняються високою ефективністю перетворення хімічної енергії палива на електричну та відносно простотою конструкції, а також слабким впливом на навколишнє середовище та відсутністю шуму, а з іншого - вкрай високою вартістю, дефіцитністю використовуваних матеріалів, складністю технології виготовлення і невеликим накопиченим досвідом створення.

Застосування для генерації електроенергії високотемпературних (850°C) твердооксидних паливних елементів, що використовують як паливо продукти високотемпературної газифікації деревної біомаси, дає змогу отримати електричний ККД на рівні 17 % для установки 350 Вт із перспективою збільшення ККД до 40 % за потужності установки 25 МВт. Однак за сьогоdnішнього рівня розвитку технологій виробництво електроенергії із застосуванням паливних елементів, що використовують продукти газифікації деревної біомаси, економічно недоцільне []. Крім того, потрібне дуже якісне очищення газу від смол, вміст яких не має перевищувати 1 мг/м³ [].

1.3 Способи очищення і кондиціонування генераторного газу

Процес очищення генераторного газу, одержуваного під час газифікації деревної біомаси, може містити в собі кілька основних етапів: видалення твердих частинок, органічних забруднень (смол), сполук сірки та азоту, аліфатичних або ароматичних вуглеводнів (якщо видалення необхідне), лужних і рідкоземельних металів, а також галогенів (у разі використання

обробленої деревини). Процес кондиціонування полягає у зміні складу синтез-газу, в основному шляхом регулювання співвідношення H_2/CO і видалення CO_2 . Необхідний ступінь очищення генераторного газу сильно залежить як від складу сировини, так і від подальшого застосування. Використання як сировини хімічно необробленої деревної біомаси істотно спрощує процес очищення газу. Під час спалювання газу в пальнику необхідне очищення тільки від великих часток, що досягається встановленням циклонів на виході з газогенератора. Для забезпечення надійної роботи газових двигунів і турбін необхідне ретельне очищення від твердих частинок і смол. У разі використання продуктів газифікації для каталітичного синтезу, крім видалення твердих частинок і смол, необхідне очищення від сполук сірки та азоту, а також кондиціонування (видалення азоту, моно- або діоксиду вуглецю, аргону, метану тощо) [5-13].

Тверді частинки, присутні в генераторному газі, складаються із золи, коксового залишку і матеріалу шару (у випадку з псевдозрідженим шаром). Для видалення твердих частинок із генераторного газу можуть бути використані такі системи: циклони, бар'єрні фільтри, електростатичні фільтри та скрубери [14]. У табл. 1.3 наведено дані про діапазон робочих температур та ефективність для різних типів сепараторів. Поділ частинок можна проводити як за високих температур за допомогою циклонів, керамічних свічкових фільтрів і фільтрів із рухомим шаром (рис. 1.6), так і за низьких температур у циклонах, шарових і рукавних фільтрах, скруберах і мокрих електростатичних фільтрах. Циклони можуть працювати в широкому діапазоні температур, проте мають низьку ефективність розділення газу та частинок, тому зазвичай використовуються на першому етапі очищення.

Таблиця 1.3

Тип сепаратора частинок	Робоча температура, °C	Ступінь видалення часток, %
Циклон	20-900	45-70

Шаровий пісчаний фільтр	20-900	80-95
Рукавний фільтр	150-750	90-99
Скрубер	20-200	40-65
Мокрий електрофільтр	40-50	95-99

Конденсація смол може стати проблемою в разі використання тканинних рукавних фільтрів, а також у разі використання води в скруберах.

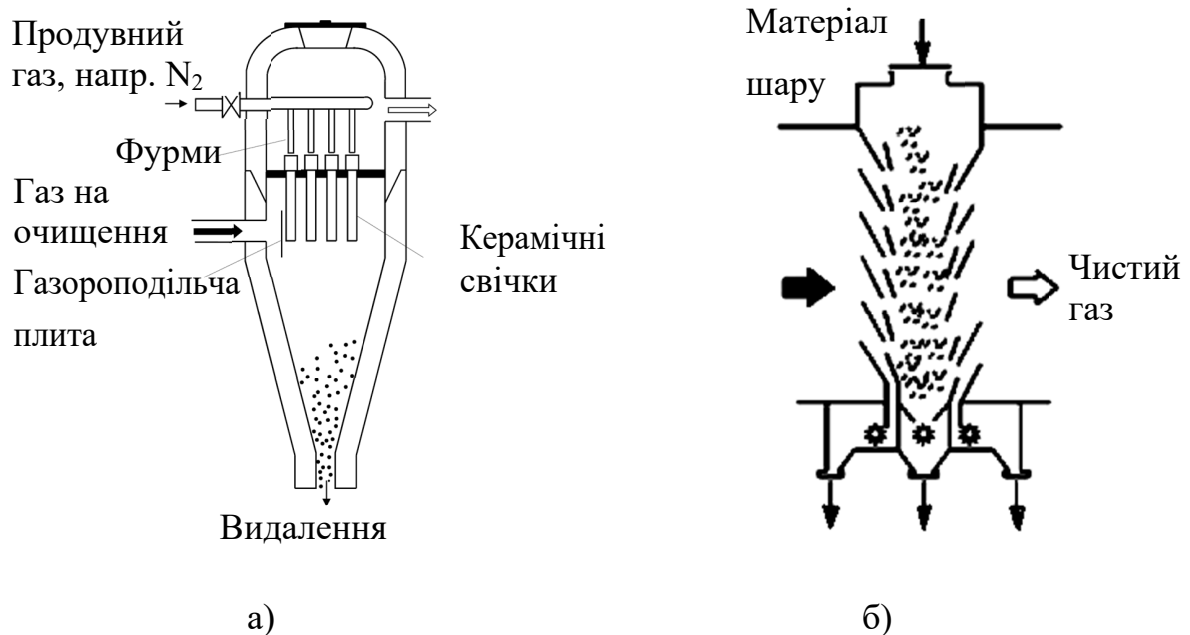
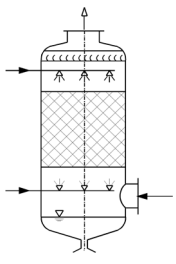
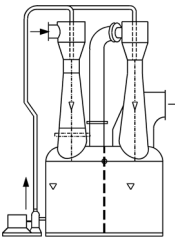
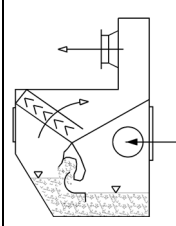
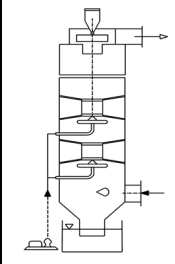
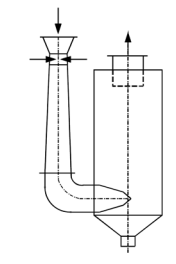


Рисунок 1.6 – Високотемпературні фільтри: керамічний/металевий - свічковий фільтр (а) і фільтр із рухомим шаром (б).

Для видалення смол із генераторного газу існує три основні методи. Перший метод - фізичне видалення під час промивання газу розчинниками (критерієм чистоти є точка роси для смол, що залишаються в газі смол) []. Другий метод - високотемпературна деструкція, як правило, здійснювана шляхом крекінгу смол при інжекції кисню. При цьому одночасно відбувається руйнування вуглеводнів (що не завжди бажано). Третій метод - каталітичне перетворення смол, яке зазвичай проводиться за допомогою каталізаторів на основі нікелю

для неочищеного газу одразу після газогенератора за підвищених температур (400-900°C).

У скруберах можливе об'єднання процесів відокремлення твердих частинок, очищення від смол (у разі використання розчинника), а також очищення від сірки та двоокису вуглецю. У табл. 1.4 показано різні типи скруберів, які використовуються для очищення газів, та їхні робочі характеристики.

Тип скрубера	Баштовий	Сопловий	Вихровий	Обертовий	Вентурі
Схема скрубера					
Розмір частинок, що сепаруються частинок, мкм (щільність. 2,42 г/см ³)	0,7 – 1,5	0,8 – 0,9	0,6 – 0,9	0,1 – 0,5	0,05 – 0,2
Швидкість газу, м/с	1	10 – 25	8 – 20	25 – 70	40 – 150
Гідравлічний опір, мбар	2 – 25	–	15 – 28	4 – 10	30 – 200
Витрата води, л/м ³	0,05 – 5	5 – 20*	–	1 – 3*	0,5 – 5
Енергоспоживання кВт·ч/1000 м ³	0,2 – 1,5	1,2 – 3	1 – 2	2 – 6	1,5 – 6

Вміст сірчистих сполук і галогенів у газі, отриманому під час газифікації деревної біомаси, вкрай низький (на рівні 30-50 ppm H₂S і близько 1 ppm COS [8]). Спеціальне очищення може знадобитися тільки для газу, до якого висуваються жорсткі вимоги (<1 ppm H₂S), наприклад, використовуваного в паливних елементах або для синтезу рідких палив. Видалення сполук сірки і галогенів проводиться шляхом мокрого очищення газів або каталітичними методами.

Основними завданнями кондиціонування газу є регулювання співвідношення H_2/CO і видалення CO_2 , оскільки для більшості промислових процесів вміст монооксиду вуглецю є вищим, ніж потрібен для синтезу, а присутність CO_2 небажана. Для збільшення співвідношення H_2/CO зазвичай використовується реакція конверсії водяного газу.

Висновки

1. Розроблення ефективних технологій переробки деревної біомаси на газоподібний енергоносіє для подальшого застосування в енергетичних цілях є актуальним завданням із погляду раціонального використання природних ресурсів, утилізації деревних відходів, а також створення засобів забезпечення автономного енергопостачання місцевим паливом.
2. Аналіз існуючих рішень показав, що термічна конверсія з подальшим використанням отриманого газу в газопоршневих електроагрегатах являє собою один з найбільш ефективних способів отримання електроенергії з деревної біомаси. Огляд технологій газифікації показав, що більшості з них притаманні такі недоліки, як високий вміст смол і баластних газів (азоту, діоксиду вуглецю), які істотно обмежують сферу їх застосування.
3. Для очищення газу використовуються спеціальні фільтри і мокрі скрубери, що знижують загальну ефективність процесу. Зазначену проблему можна розв'язати за умови використання установок, в основу яких покладено пропонований до розгляду в даній роботі принцип двостадійної термічної конверсії, що дає змогу отримувати газ, який практично не містить смол і баластних газів.
4. Двостадійна термічна конверсія є перспективним методом переробки деревної біомаси в синтез-газ. Одержуваний газ характеризується високою чистотою, середнім значенням теплоти згоряння й особливим складом, що дає змогу використовувати його як для комбінованого вироблення теплової та електричної енергії, так і для синтезу рідких палив. Досі не було створено жодної установки

безперервної дії. Дослідження у вищезазначених роботах проводилися в установках періодичної дії на лабораторному рівні (маса досліджуваних зразків становила від одиниць до десятків грамів). Необхідність у додаткових дослідженнях процесу двостадійної конверсії була викликана відсутністю інформації щодо методики розрахунку установок безперервної дії, а також відсутністю кількісних даних про вміст смол і вологи в газі. Метою експериментальних досліджень було визначення питомого вмісту смол і вологи в газі, одержуваному під час переробки деревної біомаси, а також залежності об'єму газу, що утворюється, від співвідношення мас коксового залишку і вихідної сировини.

2 ОБРУНТУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДВУСТАДІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ БІОМАСИ

2.1 Стенд експериментальної установки

Верхня і нижня частини циліндричної реторти 7 могли незалежно нагріватися двома електричними печами 3 і 6 в інтервалі температур від кімнатної до 1300°C. (рис1.1)

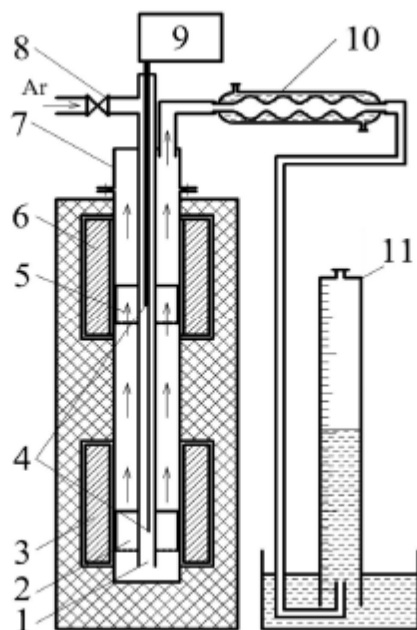


Рисунок 2.1 – Схема експериментального стенду

Темп нагріву задавався і контролювався за допомогою програмованої електронної системи управління. Температури $T_{\text{П}}$ та $T_{\text{К}}$ в зонах розташування камери з вихідною біомасою 2 (зона піролізу) і камери з коксовим залишком 5 (зона крекінгу) вимірювалися двома хромель-алюмінієвими термопарами 4, виведеними на цифровий електронний термометр 9. Обидві камери мали перфороване дно і були закріплені на трубі 1, через яку перед початком експерименту проводилося продування реторти аргоном, після чого кран 8 перекривався. Летючі продукти піролізу, залишаючи реторту, потрапляли в конденсатор 10. Рідка фракція осідала в конденсаторі, а об'єм газів, що не конденсуються, вимірювався евідіометром 11. Фото стенду наведено на рис. 2.2



Рисунок 2.2 – Фото експериментальної установки

Маса вихідної сировини, що піддається піролізу в нижній камері, у всіх експериментах становила 15 г. Як сировину використовували деревна біомаса (тирса) з характерним розміром 1 - 5 мм. Коксовий залишок цієї тирси, отриманий у результаті попередньо проведеного піролізу, поміщали у верхню камеру. На початку і наприкінці експерименту проводилося вимірювання маси зразків деревної біомаси і коксового залишку за допомогою електронних ваг «JW-1», що мають приладову похибку 0,02 г.

Було проведено дві серії експериментів, спрямовані на вивчення залежності питомого виходу синтез-газу від співвідношення мас коксового залишку і вихідної біомаси. У першій серії експериментів (визначення питомого виходу синтез-газу) верхня камера розігрівалася піччю 6 до фіксованої температури T_K , що дорівнює 1000°C . Маса коксового залишку варіювалася в межах від 2,5 до 15 г. Камера для розміщення зразка біомаси 2 розігрівалася піччю 3 з темпом $10^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ від кімнатної температури до $T_{II}=1000^{\circ}\text{C}$. У даних експериментах використовувалася попередньо висушена

протягом доби при температурі $105\pm 2^\circ\text{C}$ біомаса. Друга серія експериментів (визначення питомого вмісту смол і вологи в газі) проводилася за трьох значень температури T_K у зоні крекінгу: 850, 950 і 1000°C . Маса коксового залишку, що поміщається в верхню камеру, при всіх трьох температурах була однаковою і становила 15 г. Після того як встановлювалася температура T_K в зоні крекінгу, проводився нагрів нижньої камери з темпом $10^\circ\text{C}/\text{хв}$. Біомасу, що переробляється нагрівали до температури 700°C , яка згідно з [124] є верхньою температурною межею утворення первинних смол, і при подальшому нагріванні утворення вторинних і третинних смол відбувається не за рахунок термічної деструкції біомаси, а тільки з первинних смол.

2.2 Розробка модуля термічної обробки біомаси в газ

Робота модуля термохімічного перетворення відбувається наступним чином. Деревна біомаса (тирса, тріска) з бункера сировини подається в піролізний реактор за допомогою поршня. Силовий механізм виконує гідроциліндр, який з'єднаний з насосною станцією через гідророзподільник з електромагнітним керуванням. На вході в піролізний реактор біомаса стискається під дією сили, стискається силою поршня, утворюючи герметичну пробку, пресується в брикет, запобігаючи витоку газоподібних продуктів назовні. У вигляді спресованого брикету він транспортується поршнем через піролізний реактор до прибуття нової частини біомаси. Підведення тепла до спресованої біомаси підводиться через стінки від гарячих продуктів згорання, що утворюються в топці або пальнику. З метою забезпечення кількості теплової енергії, необхідної для підтримання процесу конверсії виконується спалювання всіх доступних видів палива, таких як природний газ, залишки коксу з біомаси або біомаси, що підлягає перетворенню. В реакторі піролізу відбувається поступовий розігрів біомаси до температури близько $500 - 700^\circ\text{C}$, що супроводжується виходом летких речовин, які через перфорацію в стінці реактора піролізу потрапляють у газові колектори, якими переміщуються у

вертикально розташовану реторту, наповнену коксовим залишком біомаси, що переробляється, - реактор крекінгу. Температура коксового залишку в реакторі крекінгу може підтримуватися за рахунок підведення тепла через стінку від продуктів згоряння на рівні 1000°C. Піролізні гази і пари проходять через нерухомий високотемпературний шар коксового залишку, в якому відбувається перетворення газів і високомолекулярних сполук (у т. ч. смол) у синтез-газ, який потім відводиться для очищення, охолодження та подальшого використання. У результаті протікання хімічних реакцій коксовий залишок у реакторі крекінгу витрачається, але постійно поповнюється коксовим залишком, що надходить із реактора піролізу. Спад маси коксового залишку в реакторі крекінгу залежить від породи використовуваної деревної біомаси, її вологості та температури в реакторі, і, як правило, не перевищує десятків відсотків від маси новоутвореного коксового залишку. Тому в термохімічному реакторі передбачено бункер коксового залишку, який може періодично розвантажуватися. Надлишок коксового залишку, що утворюється, може бути використаний як у самому процесі (для забезпечення власних потреб у теплової енергії), так і для інших цілей. Зовнішній кожух модуля термохімічної конверсії має байпас і заслінки, що дають змогу регулювати потік продуктів згоряння в зоні піролізу, тим самим забезпечуючи можливість підтримки необхідної температури реактора.

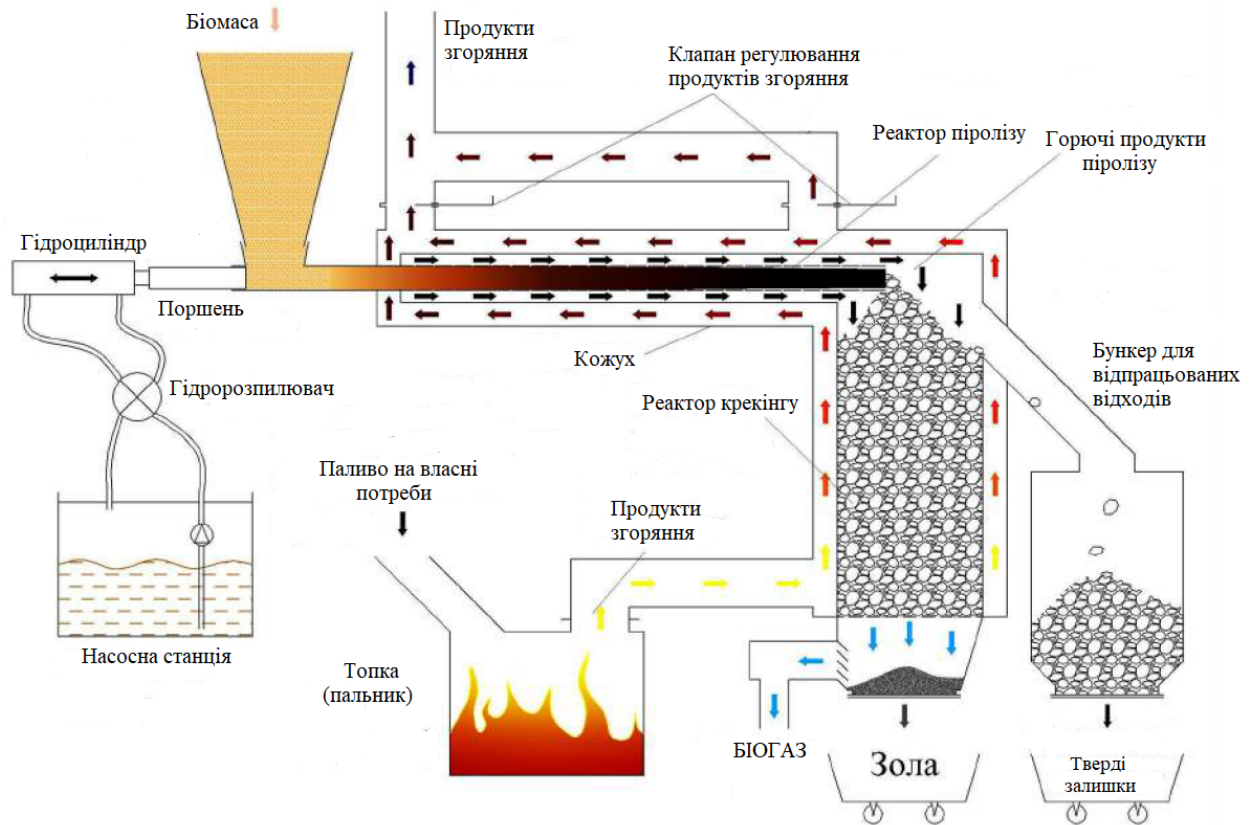


Рисунок 2.1 – Принципова схема модуля термічної обробки біомаси

2.3 Конструктивний розрахунок модуля

2.3.1 Розрахунок об'єму реактора крекінгу модуля термічної обробки

Метою розрахунку є визначення залежності достатнього для повного розкладання летючих об'єму реактора крекінгу $V_{КО}^{MTO}$, який заповнюється коксовим залишком біомаси, від масової витрати біомаси в розробленому модулі $G_{БМ}^{MTO}$. За постійних температурних умов у зоні крекінгу основним параметром, що визначає ефективність конверсії, є тривалість перебування летких у високотемпературному шарі коксового залишку (тривалість взаємодії) $\tau_{вз}$. Якщо припустити, що летючі рівномірно розподіляються за обсягом засипки коксового залишку, то величина тривалості взаємодії може бути обчислена за такою формулою:

$$\tau_{\text{вз}} = \frac{V_{\text{КО}}}{G_{\text{вЛ}}}, \quad (2.1)$$

$V_{\text{КО}}$ - об'єм коксового залишку,

$G_{\text{вЛ}}$ - об'ємна витрата летючих.

$$V_{\text{КО}} = \frac{m_{\text{ко}}}{\rho_{\text{коНАС}}}$$

$$G_{\text{л}}^{\text{EY}} = G_{\text{Л.ср.інт}}^{\text{EY}} = \frac{m_{\text{БМ}}^{\text{EY}} \delta_m^{T_{\text{КП}}}}{(T_{\text{КП}} - T_o) / v_{\text{нагр}}} \quad (2.2)$$

$$\frac{\mu_{\text{КО/БМ}}^{\min(v_{\text{нагр}})}}{G_{\text{Л.ср.інт}}^{\text{EY}(v_{\text{нагр}})}} = \text{const} = \frac{\mu_{\text{КО/БМ}}^{\min(10^\circ \text{C}/x\theta)}}{G_{\text{Л.ср.інт}}^{\text{EY}(10^\circ \text{C}/x\theta)}}$$

$m_{\text{ко}}$ - маса коксового залишку,

$\rho_{\text{коНАС}}$ - середня насипна щільність коксового залишку.

$$G_{\text{вЛ}} = \frac{G_{\text{л}}}{\rho_{\text{л}}} \quad (2.3)$$

$G_{\text{л}}$ - масова витрата летючих,

$\rho_{\text{л}}$ - густина летючих.

Передбачається, що значення середньої насипної щільності коксового залишку, а також значення густини летючих у верхній камері експериментальної установки і реакторі крекінгу модуля термохімічної конверсії однакові. У такому разі, з урахуванням 2.1 - 2.2 набуває такого вигляду:

$$\frac{m_{\text{КО}}^{\text{EY}}}{G_{\text{л}}^{\text{EY}}} = \frac{m_{\text{КО}}^{\text{MTO}}}{G_{\text{л}}^{\text{MTO}}} \quad (2.4)$$

Мінімально необхідна маса коксового залишку в експериментальній установці:

$$m_{\text{КОmin}}^{\text{EY}} = m_{\text{БМ}}^{\text{EY}} \cdot \mu_{\text{КО/БМ}}^{\min(v_{\text{нагр}})} \quad (2.5)$$

Перетворюючи (2.4) у (2.5):

$$\begin{aligned}
V_{KO}^{MTO} &= \frac{m_{BM}^{EV} \cdot \mu_{KO/BM}^{\min(v_{нагр})}}{\rho_{коНАС}} \cdot \frac{G_{л}^{MTO}}{G_{л}^{EV}} \\
V_{KO}^{MTO} &= \frac{m_{BM}^{EV} \cdot \mu_{KO/BM}^{\min(v_{нагр})}}{\rho_{коНАС}} \cdot \frac{G_{BM}^{MTO} \delta_m^{T_{КП}}}{\frac{m_{BM}^{EV} \delta_m^{T_{КП}}}{(T_{КП} - T_o) / v_{нагр}}} = \\
&= \frac{(T_{КП} - T_o)}{10^{\circ} C / x\theta)} \cdot \frac{\mu_{KO/BM}^{\min(10^{\circ} C / x\theta)}}{\rho_{коНАС}} \\
V_{KO}^{MTO} &= 0,006 \frac{M^3}{к2 / 20д} G_{BM}^{MTO}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

У розроблюваному модулі термохімічної конверсії піроліз різних порцій сировини відбувається одночасно в усьому температурному інтервалі за рахунок безперервного режиму роботи: щойно завантажена біомаса на вході в реактор має кімнатну температуру, а біомаса на виході з реактора в той самий момент часу вже нагрілася до кінцевої температури піролізу $T_{КП}$.

Тому за незмінного режиму обробки величина масової витрати летких $G_{л}^{MTO}$ є постійною і дорівнює добутку масової витрати біомаси G_{BM}^{MTO} і величини відносної витрати маси $\delta_m^{T_{КП}}$ при піролізі до кінцевої температури $T_{КП}$:

$$G_{л}^{MTO} = G_{BM}^{MTO} \cdot \delta_m^{T_{КП}} \tag{2.7}$$

В експериментальній установці процес відбувається інакше: у міру нагрівання нижньої частини камери вихід летких відбувається нерівномірно, при цьому масова витрати летких має максимум, як показано на рис. 2.2

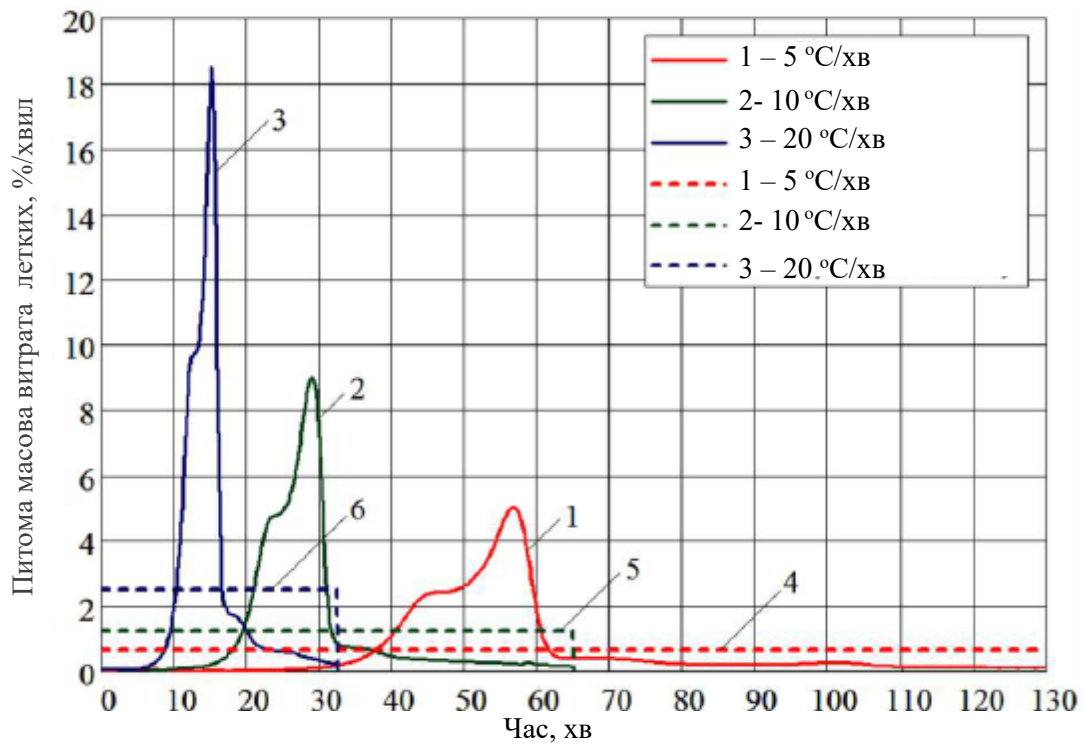


Рисунок 2.2 – Зміна в часі дійсного (суцільна лінія) та середньоінтегрального (пунктирна лінія) значення масової витрати на експериментальній установці з різним темпом нагріву (5,10 та 20 °C/хв).

Таким чином, значення масової витрати лeтких для експериментальної установки визначається наступним чином:

$$G_l^{EV} = G_{Л.ср.інт}^{EV} = \frac{m_{БМ}^{EV} \delta_m^{T_{кп}}}{(T_{кп} - T_o) / \nu_{нагр}} \quad (2.8)$$

T_o – температура зразку біомаси на початку експерименту (кімнатна).

Розглянемо залежність масової витрати повітря лeтких від темпу нагріву в діапазоні до 30 °C/хв (рис. 2.3).

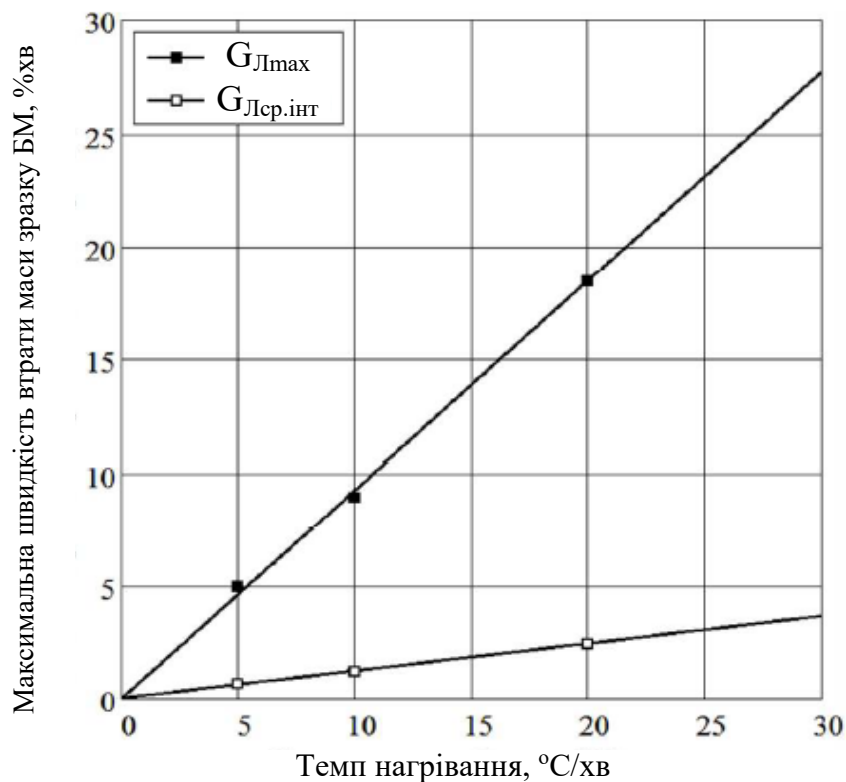


Рисунок 2.3 – Залежність максимального та середньоінтегрованих значень масової витрати летких від темпу нагрівання БМ

Таким чином, графіки показують, що для любого темпу нагріву в розглянутому діапазоні до 30°C/хв значення $\mu_{КО/БМ}^{\min(v_{нагр})}$ буде змінюватися пропорційно зміні значення масової витрати летких ($G_{Лmax}$ або $G_{Лср.інт}$). Звідси, відношення вищезазначених величин буде постійним та дорівнюватиме експериментально визначеному для темпу $v_{нагр} = 10^\circ\text{C}/\text{хв}$.

$$\frac{\mu_{КО/БМ}^{\min(v_{нагр})}}{G_{Л.ср.інт}^{ЕУ(v_{нагр})}} = const = \frac{\mu_{КО/БМ}^{\min(10^\circ\text{C}/\text{хв})}}{G_{Л.ср.інт}^{ЕУ(10^\circ\text{C}/\text{хв})}} \quad (2.9)$$

Таким чином:

$$\begin{aligned}
V_{KO}^{MTO} &= \frac{m_{BM}^{EY} \cdot \mu_{KO/BM}^{\min(v_{нагр})}}{\rho_{коНАС}} \cdot \frac{G_{BM}^{MTO} \delta_m^{T_{КП}}}{\frac{m_{BM}^{EY} \delta_m^{T_{КП}}}{(T_{КП} - T_o) / v_{нагр}}} = \\
&= G_{BM}^{MTO} \frac{(T_{КП} - T_o)}{10^{\circ} C / хв} \cdot \frac{\mu_{KO/BM}^{\min(10^{\circ} C / хв)}}{\rho_{коНАС}}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

В результаті, для тирси насипна щільність коксового залишку становить $\rho_{коНАС} = 120 \text{ кг/м}^3$. Де відбувається піроліз до кінцевої температури $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ вираз (2.10) має вигляд:

$$V_{KO}^{MTO} = 0,006 \frac{\text{м}^3}{\text{кг} / \text{год}} G_{BM}^{MTO} \tag{2.11}$$

Значення множника у формулі 2.11 може бути порівняно швидко визначено на експериментальній установці для будь-якого режиму обробки та будь-якого виду біомаси, що дасть змогу отримати значення необхідної величини об'єму реактора крекінгу під час проектування модуля термохімічної конверсії.

Висновки

Таким чином, представлені експериментальні дані, що характеризують залежність питомого виходу неконденсованих газів, одержуваних методом двостадійної піролітичної конверсії деревних відходів, і питомого вмісту в них смол і води від температури T_k в зоні гетерогенного крекінгу летких продуктів піролізу. Показано, що при 1000°C значення питомого вмісту смол і води становлять $45,8 \text{ мг/м}^3$ і $7,18 \text{ г/м}^3$ відповідно, що робить одержуваний газ придатним для використання як палива для двигунів внутрішнього згоряння без попереднього очищення від смол. Наведено результати оцінок внеску смол і води в збільшення питомого виходу неконденсованих газів, що спостерігається зі зростанням температури в зоні крекінгу в діапазоні від 850 до 1000°C . З результатів оцінок випливає, що зі зростанням температури в зоні крекінгу відбувається зміна хімічного механізму, відповідального за збільшення обсягу одержуваного газу.

На підставі отриманих даних і висунутих припущень було запропоновано метод розрахунку об'єму реактора крекінгу, достатнього для гарантованої конверсії летких піролізних продуктів піролізної деревини за заданої продуктивності установки.

3 ОБГРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результатом розрахунку об'єму реактора крекінга для продуктивності модуля терміної конверсії $G_{БМ}^{МТО}=12\text{кг/год}$ є значення $V_{КО}^{МТО}=0,072\text{ м}^3$, яке з площиною перетину реактора дорівнює $0,049\text{ м}^2$ відповідно висоті реактора $1,47\text{ м}$ та масі коксового залишку $8,6\text{ кг}$ ($\rho_{\text{кошас}}=120\text{ кг/м}^3$).

Модуль термічної конверсії має систему вимірювання (рис.3.1), який дозволяє визначити температурне поле установки (температури в 7-ми місцях, позначені на схемі (Т1-Т2) вимірювались за допомогою хромель-алюмінієвими термопарами.

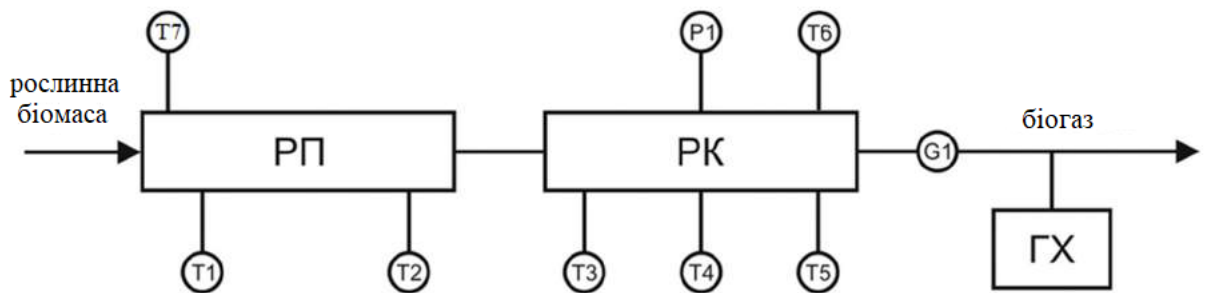


Рисунок 3.1 – Схема вимірювання: РП-реактор піролізу, РК – реактор крекінгу, ГХ –газовий хроматограф, Т1-Т7 – термопари, Р1-датчик тиску, G1-лічильник біогазу.

Показанням Т1 і Т2 відповідали значення температури металевої стінки на вході та виході реактора піролізу. Показанням Т3, Т4 і Т5 відповідали значення температури коксового залишку в середині поперечного перерізу реактора крекінгу на різних рівнях: у верхній, середній і нижній частинах реактора крекінгу відповідно. Показанням Т6 відповідала температура зовнішньої поверхні стінки реактора крекінгу, яка практично дорівнювала температурі вхідних продуктів згоряння природного газу або пропану. Показанням Т7 відповідала температура вихідних продуктів згоряння.

Відповідно до експериментальних досліджень, цільовою для реактора піролізу є температура близько 500 - 700°C (термопара T2). Для реактора крекінгу легких продуктів піролізу оптимальною є температура 1000°C. Через охолодження продуктів згоряння в газоходах температура середньої (термопара T4) і верхньої (термопара T3) частин реактора крекінгу виявлялася нижчою за оптимальну і становила 980 і 950°C відповідно. Температура стінки реактора крекінгу в зоні входу продуктів згоряння (термопара T6) з міркувань жароміцності і жаростійкості підтримувалася на рівні не вище 1100°C. Контрольне вимірювання температури T6 в деяких експериментах проводилося вручну періодично, а не в безперервному режимі. Температуру T7 вимірювалася вручну в сталому режимі. На рис. 3.2 наведено графік типової зміни температур T1 - T6 у процесі випробувань.

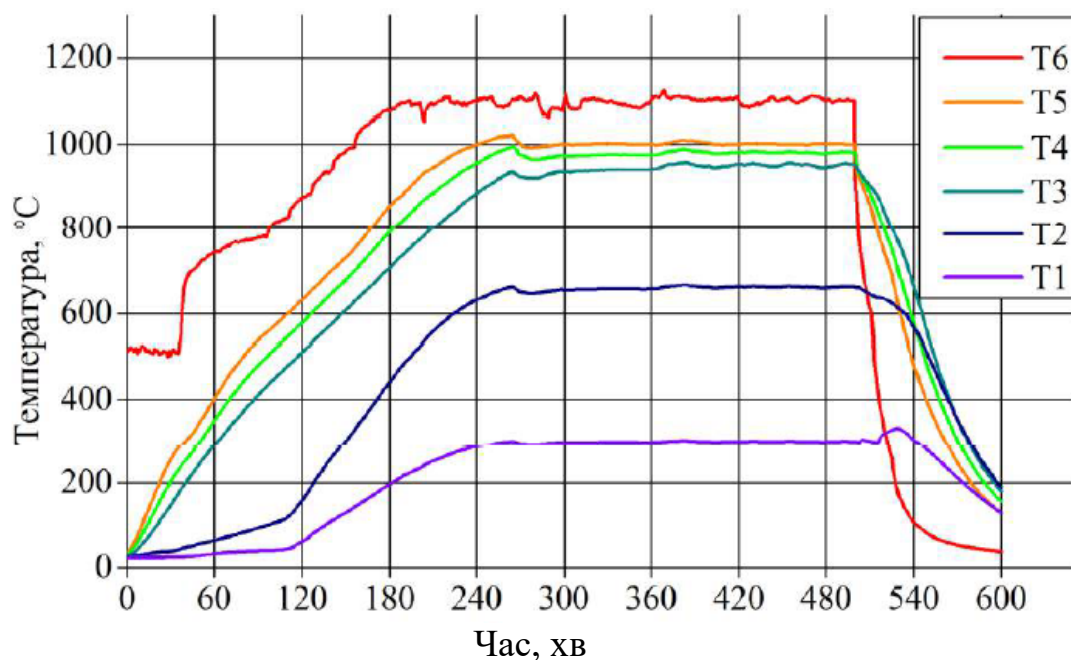


Рисунок 3.2 – Зміна температур T1-T6 в часі модуля установки

Експеримент проходить у три основні етапи: виведення установки на заданий температурний режим, робота в сталому режимі та проведення вимірювань, завершення випробувань. З наведених даних видно, що характерний час виходу на робочий режим становить близько 4,5 годин, після

чого температура у всіх зонах реактора піролізу і реактора крекінгу відповідає заданим значенням для оптимального режиму термічної переробки біомаси в синтез-газ. У сталому режимі температурне поле установки і витрата біомаси підтримуються постійними. Подавання сировини в реактор здійснюється з моменту досягнення на вході в реактор початкової температури піролізу (близько 200°C). В процесі розігріву реактора швидкість подачі сировини поступово збільшується з розрахунком виходу на задану продуктивність при досягненні робочої температури реактора.

Експерименти проводились для деревинної тирси та стружка сосни. Вихідні дані наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

Параметр	Варіант А	Варіант Б
Вид БМ	Деревинна тирса	Стружка сосни
Витрати БМ, кг/год	6	5
Маса коксового залишку в реакторі крекінгу, кг	8,6	8,6
Вид палива на власні потреби	Природний газ	Пропан
Робочий тиск газу, бар	0,1-0,4	0,4-2
Витрати палива на власні потреби в сталому режимі, м ³ /год	3,22	1,08
Теплова потужність пальника в сталому режимі, кВт	30	27,4
Потужність насосної станції	2,26	2,26
Температурні параметри реакторів піроліза і крекінга		
На вході в реактор піроліза (Т1), °С	300	250
На виході з реактору піроліза (Т2), °С	660	500
На вході в реактор крекінгу (Т3), °С	950	870
Всередині реактора крекінга (Т4), °С	980	910
На виході з реактору крекінга (Т5), °С	1000	950
На вході продукти згоряння (Т6), °С	1100	1100
На виході продукти згоряння (Т7), °С	600	570

Як видно з наведених даних, масова витрата деревної сировини в експериментах незначно відрізнялася через похибку сировини в експериментах незначною мірою різнилася через похибку налаштування завантажувального пристрою, зумовленої суттєвою різницею в насипній

густині між деревинною тирсою (~160 кг/м³) і сосною стружкою (~60 кг/м³). В обох випадках витрата біомаси становила приблизно половину від розрахункового значення. Зниження витрати біомаси виявилось вимушеним заходом, оскільки за розрахункового значення масової витрати не вдавалося досягти задовільного прогрівання брикету біомаси по всьому перерізу, що характеризувалося низьким (приблизно вдвічі нижчим за розрахункове) значенням питомого виходу біогазу. Зменшення витрати біомаси позначилося на збільшенні тривалості прогрівання брикету біомаси в реакторі піролізу і дозволило модулю термохімічної конверсії працювати в сталому режимі з розрахунковими показниками питомого виходу біогазу. Вихід летких при піролізі до температури 700°C і 1000°C для соснової стружки був дещо більшим, ніж для деревинної тирси. Незважаючи на деяке зменшення температури конверсії в експерименті із сосною стружкою (1,28 м³/кг), значення питомого виходу біогазу виявилось навіть трохи більшим, ніж в експерименті з деревинною тирсою (1,3 м³/кг), що могло мати відразу кілька причин. По-перше, коксовий залишок, покинувши реактор піролізу, деякий час перебуває в гарячій зоні верхньої частини реактора крекінгу, і тільки потім опиняється в бункері коксового залишку. Невелике зниження витрати біомаси могло позначитися на збільшенні середньої тривалості перебування коксового залишку в зоні піролізу, що призвело до збільшення питомого виходу летких. По-друге, невелике зниження витрати біомаси і відповідне зменшення витрати піролізних продуктів за однакових умов піролізних продуктів за однакового обсягу коксового залишку в реакторі крекінгу сприяло збільшенню часу їхньої взаємодії. В по-третє, значення T3 - T5 відповідають центру перерізу шару коксового залишку, тоді як у пристінній області його температура була значно вищою і могла досягати температури стінки - 1100°C, що було достатнім для протікання ендотермічних реакцій, що йдуть зі збільшенням об'єму газів. По-четверте, соснова стружка мала трохи більше високе значення показника виходу летких.

3.1 Енергетичний баланс

При зведенні енергетичного балансу проводили розрахунок усіх вхідних і вихідних енергетичних потоків. Енергія, що відповідає тепловмісту біомаси, що переробляється за одиницю часу:

$$P_{БМ} = G_{БМ} q_{БМ}^B \quad (3.1)$$

$G_{БМ}$ - масова витрата БМ;

$q_{БМ}^B$ - вища питома теплота згоряння БМ.

Теплова потужність, привнесена продуктами згоряння природного газу газу (різниця між тепловмістом на вході та на виході з модуля термічної конверсії):

$$P_{ПЗ_{ПГ}} = G_{ПЗ_{ПГ}} \int_{T_{ПЗ_{ВИХ}}}^{T_{ПЗ_{ВХ}}} C_{рПЗ_{ПГ}}(T) dT \quad (3.2)$$

$G_{ПЗ_{ПГ}}$ - масова витрата продуктів згоряння природного газу,

$T_{ПЗ_{ВХ}}$ - температура вхідних продуктів згоряння,

$T_{ПЗ_{ВИХ}}$ - температура вихідних продуктів згоряння,

$C_{рПЗ_{ПГ}}(T)$ - питома теплоємність продуктів згоряння природного газу при сталому тиску в залежності від температури.

Теплова потужність втрат через теплоізолювані стінки реактору піролізу та крекінгу в навколишнє середовище:

$$P_{ПОТ_{\Sigma}} = P_{ПОТ_{рн}} + P_{ПОТ_{рк}} \quad (3.3)$$

Енергія, яка відповідає тепловмісту твердих та газоподібних продуктів:

$$P_{Тх} = G_{БМ} \cdot q_{КО} \cdot q_{КО}^B$$
$$P_{Тф} = C_{рДР.вуг.} \cdot G_{БМ} \cdot q_{КО} (T_{РК_{вих}} - T_{нав.ср})$$

$$P_{Гф} = G_{БМ} \cdot g_{БГ} \int_{T_{БГ}}^{T_{РКвих}} C_{pБГ} dT$$

$$P_{Гх} = G_{БМ} \cdot q_{БГ} \cdot q_{БГ}^B$$

$q_{КО}^B$ - вища питома теплота згорання коксового залишку,

$C_{pДР.вуг.}$ - середня питома теплоємність деревного вугілля,

$T_{РКвих}$ - температура на виході з реактору піролізу,

$T_{нав.ср}$ - температура навколишнього середовища,

$q_{БГ}^B$ - вища питома теплота згорання біогазу

Загальне рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$P_{БМ} + P_{ПЗ} - P_{ПОТ\Sigma} = P_{Тх} + P_{Тф} + P_{Гф} + P_{Гх}$$

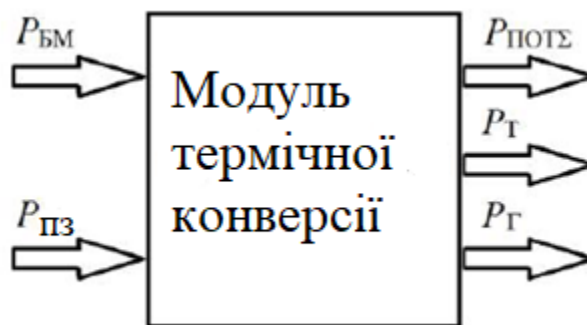


Рисунок 3.3 – Схема енергетичних потоків

Нев'язку енергетичного балансу розраховували за формулою:

$$\Delta P = (P_{БМ} + P_{ПЗ} - P_{ПОТ\Sigma}) - (P_{Тх} + P_{Тф} + P_{Гх} + P_{Гф})$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 3.2

Параметр	Величина, кВт
Енергія, що відповідає тепловмісту біомаси, що переробляється за одиницю часу, $P_{БМ}$	30,3
Теплова потужність, привнесена продуктами згорання природного газу, $P_{ПЗ}$	14,7

Теплова потужність втрат через теплоізовані стінки реакторів піролізу та крекінгу в навколишнє середовище, $P_{пот\Sigma}$	8,1
Енергія, що відповідає тепловмісту твердих і газоподібних продуктів, що утворюються за одиницю часу	
- тверді продукти, хім. P_{Tx}	9
- тверді продукти, фіз. $P_{Tф}$	0,2
- газоподібні продукти, хім P_{Gx}	24,5
- газоподібні продукти, фіз. $P_{Gф}$	2,8
Нев'язка енергетичного балансу, ΔP	0,4

Розрахунок ефективності перетворення енергії деревної біомаси, що надходить на переробку, в енергію біогазу без урахування витрат на власні потреби здійснювався за такою формулою:

$$\eta_{np} = \frac{g_{BG} \cdot q_{BG}^H}{q_{BM}^H}$$

q_{BG}^H - нижча питома теплота згоряння біогазу,

q_{BM}^H - нижча питома теплота згоряння біомаси.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) установки з переробки деревної біомаси в біогаз з урахуванням витрат на власні потреби:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{G_{BM} g_{BG} \cdot q_{BG}^H}{G_{BM} q_{BM}^H + N_{HC} + G_{ПГ} q_{ПГ}^H}$$

N_{HC} - середня електрична потужність, яка споживається насосною станцією системи завантаження біомаси.

Значення показників ефективності наведені в таблиці 3.3, які показують високу ефективність процесу конверсії деревної біомаси в біогаз, але дослідний модуль термічної конверсії має відносно низьке значення

Показники ефективності

Параметр	Величина, %
Ефективність перетворення енергії деревної біомаси в енергію біогазу	79,8
ККД установки	37,1

3.2 Методи збільшення ККД модуля термічної конверсії

Розрахунок ефективності модуля термічної конверсії показав, що для досягнення прийняттого значення ККД необхідна модернізація. Основними способами підвищення ККД у цьому випадку є збільшення ступеня використання енергії біомаси та зменшення теплових втрат із вихідними продуктами згоряння.

Перше завдання може бути вирішене за рахунок збільшення ступеня конверсії вуглецю при переробці надлишку коксового залишку або методом парової газифікації з отриманням додаткової кількості біогазу, або спалюванням для забезпечення власних потреб у тепловій енергії. Для реалізації варіанта з паровою газифікацією необхідними умовами є отримання пари з високими параметрами та організація підведення значної кількості теплової енергії в реакційну зону, що видається вкрай складно через малоефективний процесу теплопереносу через стінку реактора.

Тому було обрано другий варіант, що поєднує в собі низку істотних переваг: високий ступінь конверсії вуглецю при спалюванні і можливість заміни природного газу (пропану), що спалюється в пальниках, на коксовий залишок - побічний продукт переробки. У цьому разі зникає залежність від наявності газоподібного палива, а схема переробки стає утилізаційною. Недоліками цього варіанта є ускладнення установки і збільшення споживання електроенергії, зумовлені появою автоматизованої твердопаливної топки.

Завдання зменшення теплових втрат із вихідними продуктами згоряння може бути вирішене як за рахунок збільшення ефективності теплообмінних процесів усередині установки (удосконалення проточних частин проточних частин теплообмінних апаратів за рахунок використання розвиненого ребрення та оптимізації геометрії каналів теплоносіїв), так і за рахунок рекуперації частини теплової енергії димових газів для підігріву повітря, наступного потім у твердопаливну топку на спалювання. Недоліком останнього рішення також є ускладнення установки та збільшення споживання електроенергії, зумовлені появою теплообмінного апарату і повітродувки. Принципова схема, що включає запропоновані напрями модернізації, представлена на рис. 3.4. Основними параметрами теплового розрахунку для цієї схеми є: витрати біомаси $G_{БМ}^*$, температура $T_{пов.вх}^*$ вхідного в твердопаливну топку (ТТ) повітря, який попередньо підігрівається в повітропідігрівачі (ПП), температура $T_{пз.вих}^*$ продуктів згоряння коксового залишку на виході з реактору піролізу (РП).

На рисунку 3.4 відмічені витрат $G_{пз.ко}^*$ продуктів згоряння коксового залишку та їх температура $T_{пз.вх}^* = 1100^{\circ}\text{C}$.

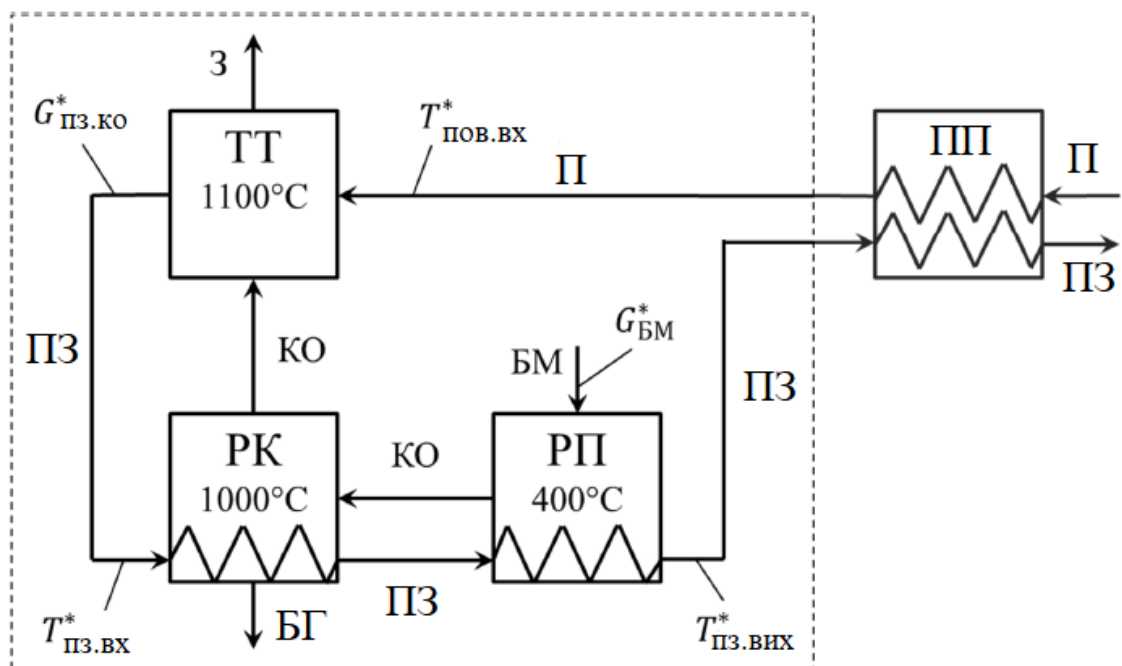


Рисунок 3.5 – Принципова схема модернізованої установки

РП-реактор піролізу, РК-реактор крекінгу, ТТ-твердопаливна топка, ПП – повітропідігрівач, БМ – біомаса, КО – коксовий залишок, ПЗ – продукти згоряння, БГ – біогаз, З – зола, П – повітря.

Розрахунку повітропідігрівача в рамках оптимізаційної задачі не здійснюють, проте отримані результати підтверджують можливість нагріву необхідної кількості повітря за рахунок теплоти продуктів згоряння, що виходять із реактора піролізу продуктів згоряння, що виходять із реактора (достатні значення температурного напору і тепловмісту). Для оцінки можливого збільшення ККД модуля термічної конверсії при впровадженні цих рішень було зроблено тепловий розрахунок, особливості проведення якого описано нижче. Як оптимальний ступеня конверсії деревної біомаси в біогаз було обрано режим піролізу біомаси до кінцевої температури 400°C, за якого, з одного боку, вже відбулося основне газовиділення, а з іншого боку, в коксовому залишку все ще зберіглася частина енергії вихідної біомаси, достатня для задоволення власних теплових потреб. Таким чином були прийняті такі значення: ККД твердопаливної топки 95%, енергоспоживання на власні потреби 5,26 кВт, питомий вихід утвореного біогазу 1,13 м³/кг при питомому виходу (на 1 кг біомаси) 0,265.

Теплові втрати через теплоізоляцію були розраховані для заданих температурних умов за фіксованого значення продуктивності модуля термічної конверсії за вихідною сировиною, що дорівнює 10 кг/год, а потім приймалися такими, що лінійно збільшуються пропорційно до передбачуваному зростанню площі зовнішньої поверхні реактора, що відповідає збільшенню витрати біомаси. Оцінки показали, що теплова потужність втрат $P_{пот\Sigma}$ збільшуватиметься приблизно на 2 кВт на кожні 10 кг/год приросту продуктивності. Вираз для теплової потужності втрат записувався у вигляді функціональної залежності від витрати біомаси $G_{БМ}^*$:

$$P_{пот\Sigma}^* (G_{БМ}^*) = 7,5кВт + 2кВт\left(\frac{G_{БМ}^*}{10кг/год} - 1\right) \quad (3.1)$$

Вираз для теплової потужності $P_{ПЗКО}^*$, привнесеної продуктами згоряння коксового залишку (різниця між тепловмістом на вході і на виході з модуля термічної конверсії), було записано у вигляді функціональної залежності від витрати біомаси, температури продуктів згоряння, що виходять з модуля термічної конверсії і температури повітря, що подається в топку, підігрів якого відбувається в повітропідігрівачі за рахунок продуктів згоряння, що виходять:

$$P_{ПЗПвх}^* (G_{БМ}^*, T_{пов.вх}^*, T_{ПЗвих}^*) = G_{ПЗКО}^* (G_{БМ}^*, T_{пов.вх}^*) \int_{T_{ПЗВВХ}}^{T_{ПЗВХ}} C_{рПЗКО}^* (T_{пов.вх}^*, T^*) dT^* \quad (3.2)$$

$$G_{ПЗКО}^* (G_{БМ}^*, T_{пов.вх}^*) = G_{БМ}^* x_{КО}^* g_{ПЗКО}^* (T_{пов.вх}^*) \quad (3.3)$$

$x_{КО}^*$ - питомий (на 1 кг біомаси) вихід коксового залишку, $g_{ПЗКО}^*$ - питома (на 1 кг коксового залишку) маса продуктів згоряння коксового залишку.

Аналіз виразу (3.2) свідчить, що величина $P_{ПЗКО}^*$ зменшиться із збільшенням температури вихідних продуктів згоряння коксового залишку і навпаки, збільшується із зменшенням $T_{ПЗВВХ}^*$. В реальності величина $T_{ПЗВВХ}^*$ залежить від складу продуктів згоряння та ефективності теплообміну в реакторі, але в даній оптимізаційній задачі розглянемо в якості незалежного параметра.

Рівняння енергетичного балансу вирішували чисельним методом (метод хорд) відносно температури вихідних продуктів згоряння з модулю термічної обробки:

$$P_{БМ}^* (G_{БМ}^*) + P_{ПЗКО}^* (G_{БМ}^*, T_{пов.вх}^*, T_{ПЗвих}^*) - P_{ПОТ\Sigma}^* (G_{БМ}^*) - \left[P_{Тх}^* (G_{БМ}^*) + P_{Тф}^* (G_{БМ}^*) + P_{Гх}^* (G_{БМ}^*) + P_{Гф}^* (G_{БМ}^*) \right] = 0 \quad (3.4)$$

Отримана залежність $T_{ПЗвих}^{*(onm)}(G_{БМ}^*, T_{пов.вх}^*)$ описує зміну температури продуктів згоряння коксового залишку на виході з модулю термічної конверсії для кожної пари значень $G_{БМ}^*$ та $T_{пов.вх}^*$ з якими виконується рівняння (3.4). З фізичної точки зору отримане значення $T_{ПЗвих}^{*(onm)}$ є граничною температурою

вихідних продуктів згоряння, з якою теплова потужність буде достатньою для забезпечення теплових потреб процесу конверсії (рис.3.6).

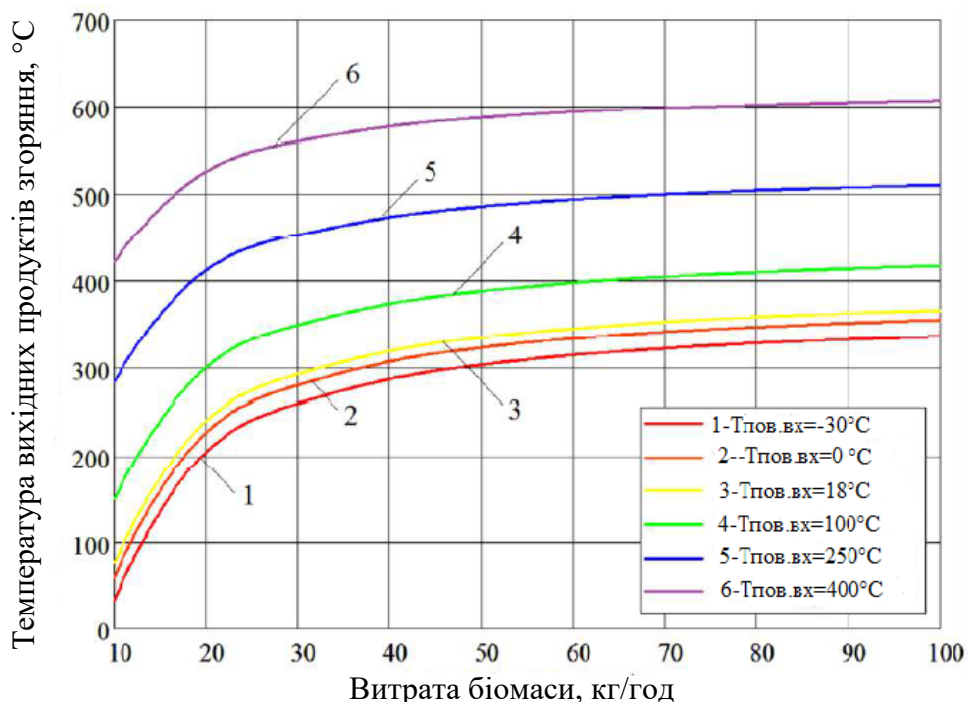


Рисунок 3.6 – Залежність граничної температури вихідних продуктів згоряння від витрати БМ при різних значеннях температур повітря, який подається в топку

Для кожної з кривих, представлених на рис. 3.6, значення, що лежать вище кривої, відповідатимуть такому режиму роботи, коли теплової потужності від спалювання коксового залишку недостатньо для забезпечення власних потреб і необхідна додаткова кількість палива, а значення, що лежать нижче кривої, відповідатимуть режиму, в якому теплова потужність від спалювання коксового залишку якому теплова потужність від спалювання всього коксового залишку перевищує достатнє для забезпечення власних потреб значення, тобто коксовий залишок буде використовуватися в топці не повністю.

Таким чином, будь-якій парі значень витрати біомаси і температури повітря, що подається в топку, відповідає оптимальному значенню температури продуктів згоряння, що виходять, за якого відбувається повне використання коксового залишку і досягається максимальне значення ККД модуля термохімічної конверсії.

Оптимальною температурою повітря, що подається в топку, було обрано значення 250°C , яке є граничним значенням температури повітря, що подається для топки «ТЛЗМ-0,5/2,4», обраної для використання в модернізованій установці завдяки відповідності заявлених вимог до сировини та високого ступеня автоматизації [1,3,6].

На рис. 3.7 наведено залежність ККД модуля термохімічної конверсії від витрати біомаси за різних значень температури продуктів згоряння, що виходять.

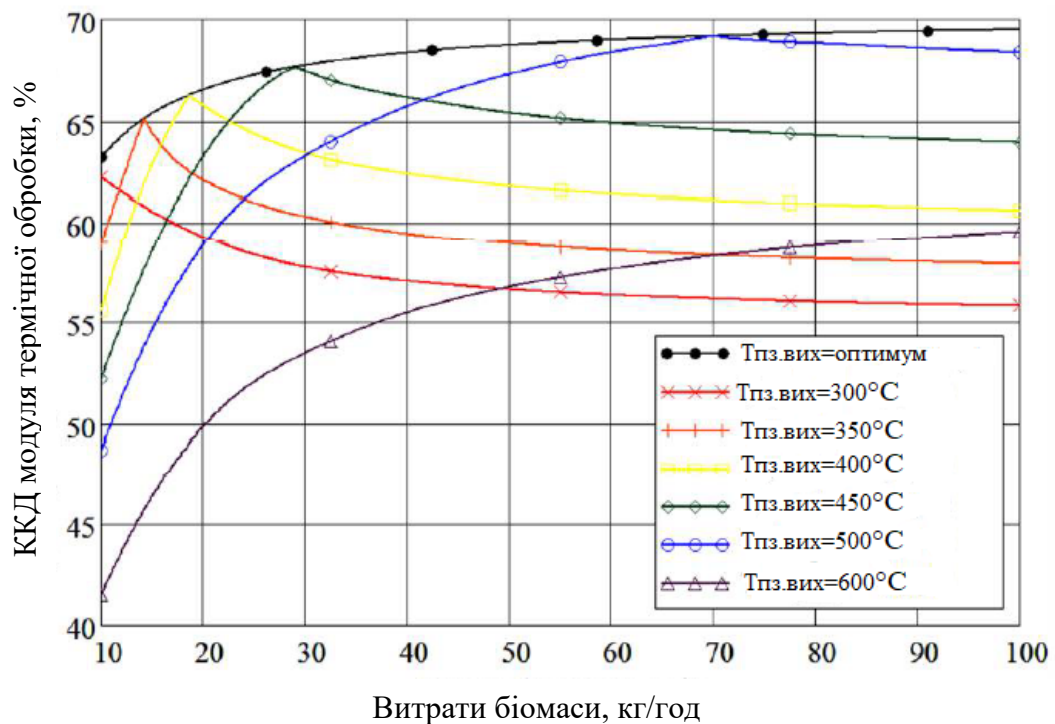


Рисунок 3.7 – Залежність ККД модуля термічної конверсії від витрати біомаси при різних значеннях температури вихідних продуктів згоряння (температура повітря, що подається в топку 250°C)

З графічних залежностей, для кожного значення температури продуктів згоряння, що виходять, існує єдине максимальне значення ККД модуля термічної конверсії, а сукупність цих значень відповідає кривій на графіку, що показує залежність максимального ККД від витрати біомаси за оптимальних значень температури вихідних продуктів згоряння. Крім того, відзначається збільшення значення ККД із підвищенням витрати біомаси.

Ефективність перетворення енергії деревинної БМ (в оптимальному режимі), яка потрапляє на переробку в енергію біогазу без урахування витрат на власні потреби:

$$\eta_{пр}^* = \frac{g_{БГ}^* q_{БГ}^H}{q_{БМ}^H} \quad (3.5)$$

Таким чином, після проведення модернізації значення максимального ККД модуля термічної конверсії з урахуванням витрат на власні потреби буде в діапазоні 63,2 - 69,5% залежно від витрати біомаси (у діапазоні 10 - 100 кг/год). Ключову роль у підвищенні ефективності процесу переробки відіграє зменшення температури продуктів згоряння, що виходять, яке досягається завдяки удосконаленню проточних частин теплообмінних апаратів за рахунок використання розвиненого ребрення та оптимізації геометрії каналів теплоносіїв, а також попередній підігрів повітря, що подається в топку повітря. На практиці підтримання близького до оптимального режиму конверсії може бути реалізовано за рахунок досягнення оптимальних значень витрати коксового залишку під час встановлення датчика заповнення паливного бункера твердопаливної топки, що дає змогу відстежувати динаміку зміни обсягів утворення і використання коксового залишку. У цьому разі коксовий залишок біомаси перестане бути побічним продуктом процесу конверсії та стане основним і єдиним паливом для підтримки температурного режиму переробки.

В таблиці 3.4 наведені показники ефективності модернізованого модуля термічної конверсії та інших устаговок.

Порівняльні характеристики ефективності

Технологія	Ефективність	ККД установки
Двостадійна термічна конверсія (експериментальна установка)	79,8	37,1
Двостадійна термічна конверсія (модернізована установка)	70,3	63,2-69,5
Два реактора з киплячим шаром	80,4	64,3
Прямоточний з плотним шаром	65-75	60-70
Двостадійна газифікація	82,1	

Представлені дані свідчать про порівняно високі показники ефективності конверсії деревної біомаси в біогаз і ККД установки для модернізованого модуля термічної конверсії, що підтверджує доцільність подальших розробок у цій галузі.

Висновки

Розроблено принципову схему та проведено експериментальні дослідження модуля термічної конверсії з безперервним режимом роботи, що використовує принцип двостадійної термічної конверсії деревної біомаси в біогаз. Під час випробувань двох однакових модулів із продуктивністю за вихідною сировиною 6,0 кг/год (тирса) і 5,0 кг/год (соснова стружка) було підтверджено працездатність схеми та отримано кількісні дані про масові та енергетичні потоки, а також температурне поле установки. Ефективність перетворення енергії біомаси в енергію біогазу, розрахована для одного з модулів, склала 79,8 %, ККД модуля з урахуванням власного споживання - 37,7 %. Було розроблено та обґрунтовано рекомендації щодо удосконалення принципової схеми та конструкції з метою підвищення ККД модуля термічної конверсії. Проведено розрахунок, який показав можливість збільшення ККД модуля з урахуванням власного споживання до значень 63,2 - 69,5 %.

Експериментальні та розрахункові дані прийнято як вихідні для оцінки економічної ефективності автономної електростанції на базі модуля термічної конверсії.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Організація охорони праці на підприємствах

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

Проводяться такі інструктажі з охорони праці та безпеки життєдіяльності:

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

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

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

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

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

Спеціалісти з охорони праці мають право:

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

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

4.2.1. Загальні положення

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

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

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

4.2.2 Вимоги безпеки праці перед початком робіт

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

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

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

Власник підприємства несе відповідальність за забезпечення виконання заходів.

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

4.2.3 Вимоги безпеки праці під час виконання робіт

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

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

Забороняється проводити роботи в приміщеннях, де розміщені газові установки:

- Влаштувати тимчасові електромережі або електропроводку на легкозаймистих основах.

Експлуатувати механічно пошкоджені електроприлади.

Експлуатувати механічно пошкоджені електроприлади;

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

Проведення вогневих, зварювальних та інших робіт без спеціального дозволу;

- Увімкнення лабораторного або електрообладнання без дозволу викладача;

- Захаращення шляхів евакуації або аварійних виходів.

4.2.4 Вимоги безпеки праці в аварійних ситуаціях

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

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

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

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

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

- Евакуюйте людей та матеріальні цінності;

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

- За необхідності відключити колектор і вентиляційні системи;

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

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

4.2.5 Вимоги безпеки праці після завершення робіт

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

Відповідальний за пожежну безпеку на об'єкті після

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

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

Переконатися у відсутності порушень, які можуть призвести до пожежі;

- Відключити електроживлення електроприладів та обладнання.

(крім електроустановок.

виключаються).

Висновки.

Для покращення умов охорони праці слід врахувати наступні положення

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

- Забезпечення працівників необхідними засобами індивідуального захисту та спецодягом;

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

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

- не допускати виконання робіт несправними інструментами; і

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

Також проводьте повторне навчання з охорони праці.

- Підтримуйте в актуальному стані сертифікати з охорони праці.

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$W_6 / W = 2,4 \text{ рази}$$

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

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

Z_m – вартість палива, грн./ т;

B – річна економія палива, т;

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

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

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

I – сумарні експлуатаційні витрати, грн.

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

У такому разі економічний ефект слід визначити з виразу:

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

Обчислемо термін окупності використання ВДЕ за формулою:

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

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

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

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

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

T – тривалість доби, год.

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

Економія газу визначається за формулою:

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

$$B = 21176 \text{ м}^3$$

де $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – нижча теплота згоряння природного газу 35 МДж / м³

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

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

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

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

В даний час вартість 1000 м³ газу для виробничих і управлінських об'єктів становить 6990 грн. Враховуючи ці дані, визначте вартість запасеного природного газу за формулою:

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

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

$$T_{\text{НПДЕ}} = 89856 / 82978,156 = 0,81 \text{ рік} = 1,4 \text{ років}$$

Результати розрахунків наведені в таблиці додатку 1

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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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

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

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

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

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 прирівняти 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}	рік	1,4