

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут
ім. акад. І.С.Гулого**

Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту

_____ Сергій БЛАЖЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

« ___ » _____ 2024 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Валентин ПЕТРЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

« ___ » _____ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності _____ 144 Теплоенергетика _____
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми _____

_____ Теплоенергетика та енергоефективні технології _____

на тему: Газогенератор нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику
тепловою потужністю 1000 кВт

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ТЕ-2-9М

_____ Ніколаєнко Олексій Іванович _____
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник _____ Вольчин Ігор Альбінович _____
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Рецензент _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад.І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь _____ магістр _____

Спеціальність _____ 144 Теплоенергетика _____
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Теплоенергетика та енергоефективні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЕХТ

проф. Петренко В.П.

“20” листопада 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Ніколаєнка Олексія Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Газогенератор нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику тепловою потужністю 1000 кВт

керівник роботи: д.т.н., проф. Вольчин Ігор Альбінович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “20.11.2023 року №940-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 06.02.2024 року

3. Вихідні дані до роботи:

матеріали переддипломної практики

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

1. Літературний огляд в області використання біомаси в якості палива

2. Типи газогенераторних установок

3. Розрахунок газогенератор нижнього ходу на пелетах соняшнику

4. Висновки

5.Список використаної літератури

6. Перелік графічного матеріалу

презентація Power Point (слайди)

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

8. Дата видачі завдання: 11.11.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд в області використання біомаси в якості палива	11.11-21.11.23	Виконано
2	Типи газогенераторних установок	22.11-05.12.23	Виконано
3	Розрахунок газогенератор нижнього ходу на пелетах соняшнику	06.12.23-10.01.24	Виконано
4	Оформлення кваліфікаційної роботи	30.12-28.01.24	Виконано
5	Оформлення презентації в середовищі Power Point	29.01-06.02.24	Виконано

Здобувач

_____ (підпис)

Олексій НІКОЛАЄНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Ігор ВОЛЬЧИН

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Інформаційний блок		5
Анотація		7
Вступ		9
1	Літературний огляд в області використання біомаси в якості палива	11
	1.1. Основи газифікації твердого палива	11
	1.2. Технологічні процеси з використанням газифікації	23
	1.3. Оцінка термічної ефективності газогенератора	28
	1.4. Фізико-технічні характеристики біомаси	28
2	Типи газогенераторних установок	37
	2.1. Схеми газифікації в шільному шарі	37
	2.2. Система газифікації нижнього ходу Imbert	52
	2.3. Порівняльна характеристика шарових газогенераторів і газогенераторів в киплячому шарі	59
	2.4. Система охолодження і очистки газу	60
3	Розрахунок газогенератор нижнього ходу на пелетах соняшнику	69
	3.1. Розрахунок газифікатора	69
	3.2. Розрахунок основних розмірів газогенератора	74
	3.3. Розрахунок системи охолодження і очистки газу	74
Висновки		76
Список використаних літератури		77

ІНФОРМАЦІЙНИЙ БЛОК

Актуальність дослідження.

В розрізі зменшення обсяг викидів CO₂ та використання відходів маслоекстракційного виробництва є актуальним впровадження газогенераторів на дановму виді палива. Тренд використання біомаси з кожним роком росте, і в Україні є всі ознаки успішного впровадження установок даного типу.

Зв'язок дослідження роботи з науковими програмами.

Робота виконана у відповідності плану НДР кафедри теплоенергетики та холодильної техніки НУХТ на 2024 р.

Мета дослідження.

Аналіз можливостей застосування газогенераторів на пелетах соняшнику.

Завдання дослідження.

Рохрахувати газогенератор нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику тепловою потужністю 1000 кВт.

Об'єкт дослідження.

Процеси використання пелет соняшнику для генерації іншого виду палива – генераторного газу.

Предмет дослідження.

Газогенератор нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику тепловою потужністю 1000 кВт.

Практичне значення отриманих результатів.

Одержані результати можна використати при проектуванні газифікаторів даного типу.

Особистий внесок магістранта.

Магістрант:

- здійснив літературних огляд публікацій з питань дослідження в області газогенерації із твердого палива та біомаси;
- виконав розрахнки газогенератора тепловою потужністю 1000 кВт.

Публікації.

За матеріалами магістерського дослідження публікацій автора на момент його захисту – відсутні.

Структура магістерської роботи.

Магістерська робота складається із вступу та 3 розділів, висновків та списку використаної літератури. Повний осяг роботи становить 77 стор. Робота містить 20 таблиць та 32 рисунки.

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі розглянуто актуальне питання використання відновлювальних джерел енергії при виробництві іншого виду палива в газогенераторі нижнього ходу.

Проаналізовано можливість і варіанти застосування газогенераторів на біомасі.

Наведено конструкції та схеми різних газогенераторів.

Виконано розрахунок газогенератора потужністю 1000 кВт на пелетах соняшнику.

Ключові слова: газогенератор, біомаса, димові гази, пелети соняшнику.

ANNOTATION

In the qualification work, the actual issue of using renewable energy sources in the production of another type of fuel in the gasifier of the lower course is considered.

The possibility and options for using biomass gasifiers are analyzed.

Designs and schemes of various gasifiers are given.

The calculation of a gas generator with a capacity of 1000 kW on sunflower pellets has been performed.

Key words: gasifier, biomass, flue gases, sunflower pellets.

ВСТУП

Біомаса є перспективним джерелом відновлюваної енергії у світі та в Україні. Наразі біомаса посідає четверте місце у світі за обсягами використання енергії. В останні роки в Україні поступово збільшується кількість та встановлена потужність об'єктів, що виробляють теплову та електричну енергію з біомаси. Сталий розвиток біоенергетики дозволить зменшити залежність України від дорогих імпортованих енергоносіїв та ефективно використовувати місцеві потенційні ресурси. Перехід на використання біомаси для енергетичних потреб сприяє розвитку місцевої економіки за рахунок збору податків і зборів, а на національному рівні покращує торговельний баланс країни за рахунок скорочення імпорту енергоносіїв. Очікується також позитивний соціальний вплив завдяки створенню нових робочих місць, зниженню ціни на тепло та підвищенню надійності теплопостачання. Велика кількість вже реалізованих та успішних проєктів, економічний потенціал, державна підтримка та сприяння розвитку біоенергетики заохочують інвесторів та фінансові установи до реалізації нових біоенергетичних проєктів в Україні.[1] .

Біомаса та біопаливо можуть замінити традиційні види палива та енергоносіїв у тепло-, електрогенерації та на транспорті. Роль біоенергії в секторі виробництва тепла особливо важлива, оскільки біомаса може безпосередньо замінити природний газ і вугілля.

Щодо сектору електроенергетики, слід зазначити, що, на відміну від сонячної та вітрової енергетики, виробництво електроенергії з біомаси/біогазу є стабільним і, крім того, електростанції на біомасі можуть бути включені до збалансованого ринку електроенергії в Україні.

Україна взяла на себе міжнародне зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів відповідно до Паризької угоди 2015 року. Наразі скорочення викидів парникових газів, передбачене цим зобов'язанням, становить 40% від рівня 1990 року у 2030 році, але в найближчі роки цей показник може значно зрости, досягнувши близько 70% від рівня 1990 року у 2050 році.

Для досягнення цієї нової мети Україні необхідно перейти до низьковуглецевої економіки, значно скоротити споживання викопного палива, підвищити енергоефективність та активно впроваджувати відновлювану енергетику. За попередніми оцінками експертів, до 2050 року частка відновлюваної енергетики в енергетичному секторі України може досягти 65%, з яких на біоенергетику може припадати більше половини. Таким чином, біоенергетика може зробити значний внесок у декарбонізацію енергетичного сектору та скорочення викидів парникових газів.

1. Літературний огляд в області використання біомаси в якості палива

1.1. Основи газифікації твердого палива [2]

Загальною характеристикою твердого палива є його термічна нестабільність. Всі види палива розкладаються при нагріванні з утворенням летких продуктів і твердих залишків. Газифікація - це термохімічний процес, під час якого тверде паливо перетворюється на горючі гази (суміші CO, H₂ тощо) для подальшого спалювання (енергетичний або побутовий газ) або для технічних цілей (технологічний газ) шляхом додавання кисню. Метою газифікації є повне перетворення твердого палива в газоподібне.

Газифікація базується або на неповному згорянні палива (за відсутності кисню), або на повному згорянні, коли вуглець реагує з вуглекислим газом і водяною парою, утворюючи горючі гази (CO, H₂ тощо). Друга реакція є ендотермічною. Цей процес характеризується повним згорянням палива з киснем, максимальним виділенням тепла і утворенням відпрацьованих газів (наприклад, CO₂, H₂O) як повних (негорючих) продуктів окислення і шлакової золи як твердого, негорючого залишку. Спалювання відрізняється від так званого повільного окислення тим, що інтенсивність реакції та виділення тепла дуже високі.

На рисунку 1.1 схематично показано механізми процесу газифікації. Вивчення механізмів газифікації ускладнюється їх складною взаємодією, різноманітністю і неможливістю експериментального дослідження багатьох процесів (через їх швидкоплинний характер). Умовно весь процес газифікації поділяють на стадії:

- нагрівання та сушіння палива;
- піролітичне розкладання палива на газоподібні продукти та твердий залишок;
- газифікація вугільного залишку.

Склад і маса газів, що утворюються при піролізі, залежать головним чином від температури процесу, типу палива і швидкості нагрівання частинок. Наприклад, до складу летких продуктів піролізу твердого палива, отриманих

при температурі піролізу 550 °С, входять водяна пара, смоли, кислоти та гази, що не конденсуються (CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , C_nH_m), тоді як до складу газів, що не конденсуються при температурі вище 800 °С, входять переважно CO та H_2 . У таблиці 1.1 наведено середні властивості продуктів піролізу деяких видів твердого палива, взяті з роботи [3].

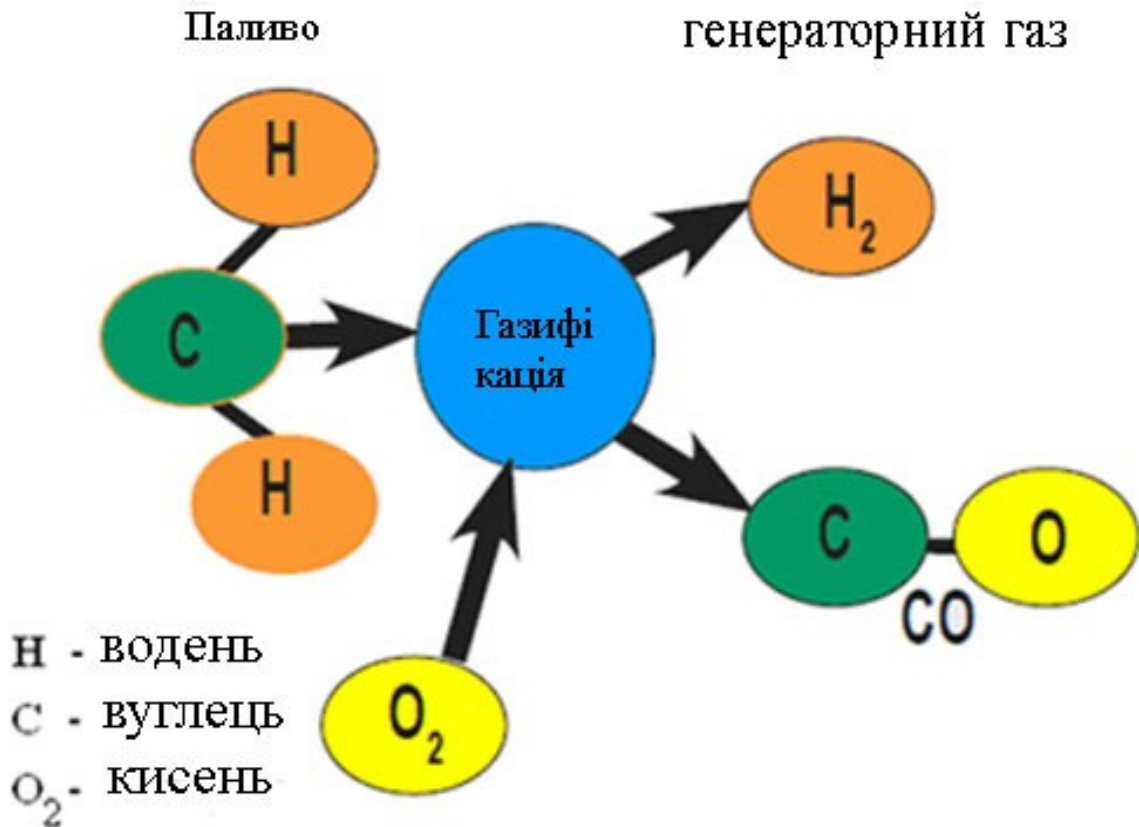


Рис. 1.1. Процес газифікації

Як видно з таблиці 1.1, при піролізі твердого палива утворюються карбонізовані залишки, що складаються переважно з вуглецю; маса залишків залежить від типу палива і коливається від 15% до 87% від початкової маси палива. Чим молодше тверде паливо, тим менша маса карбонізованого залишку.

Газифікація вуглецевих залишків призводить до утворення горючих газів. Газ, що утворився, - це газ, що утворюється в результаті взаємодії вуглецю з будь-яким газоподібним реагентом, який повинен містити горючий компонент. Як реакційні гази зазвичай використовуються повітряно-кисневі, водяна пара, чистий кисень, водяна пара і повітря або суміш водяної пари і кисню. [2]. На рисунку 1.1.2 показано класифікацію методів газифікації

відповідно до того, як вони впливають на сировину. На діаграмі також показано теплотворну здатність газу, виробленого різними типами газифікаторів, і можливі сфери його застосування.

Таблиця 1.1

Основні усередненні характеристики продуктів піролізу деяких твердих палив при температурі 550 °С

Вид палива	Марка палива	Вихід летких летких	Вуглецевий залишок	Склад летких (суха маса)			
				Смоли	Вода	Кислота	Горючий газ
		% на суху масу	%	% (об)			
Кам'яне вугілля	Т	13	87	2–5	0–1	–	8–12
Кам'яне вугілля	Г, Д	32–40	60–68	12–15	3–5	–	17–20
Буре вугілля	Б	30–40	60–70	5–11	7–8	–	12–19
Торф (сухий)	кусковий	70	30	8–20	20–30	0,8–1,0	18–24
Древина (суха)	–	85	15	15	23	3-6	28

При газифікації вуглецевих залишків утворюються горючі гази. Газ, що утворився, - це газ, що утворюється в результаті взаємодії вуглецю з будь-яким газоподібним реагентом, який повинен містити горючий компонент. Як реакційні гази зазвичай використовуються повітряно-кисневі, водяна пара, чистий кисень, водяна пара і повітря або суміш водяної пари і кисню [2]. На рисунку 1.2 показано класифікацію методів газифікації відповідно до способу впливу на сировину. На діаграмі також показано теплотворну здатність газу, виробленого різними типами газифікаторів, і можливі сфери його застосування.

Найпростіший метод - газифікація з використанням лише кисню повітря. Вуглецеві залишки від процесу піролізу в газогенераторі спалюються з обмеженою подачею повітря (зазвичай коефіцієнт надлишку повітря становить 0,25). Продуктом газифікації є згенерований повітрям газ з низькою теплотворною здатністю, що складається в основному з водню і чадного газу,

розбавленого азотом з повітря і деякою кількістю вуглекислого газу.

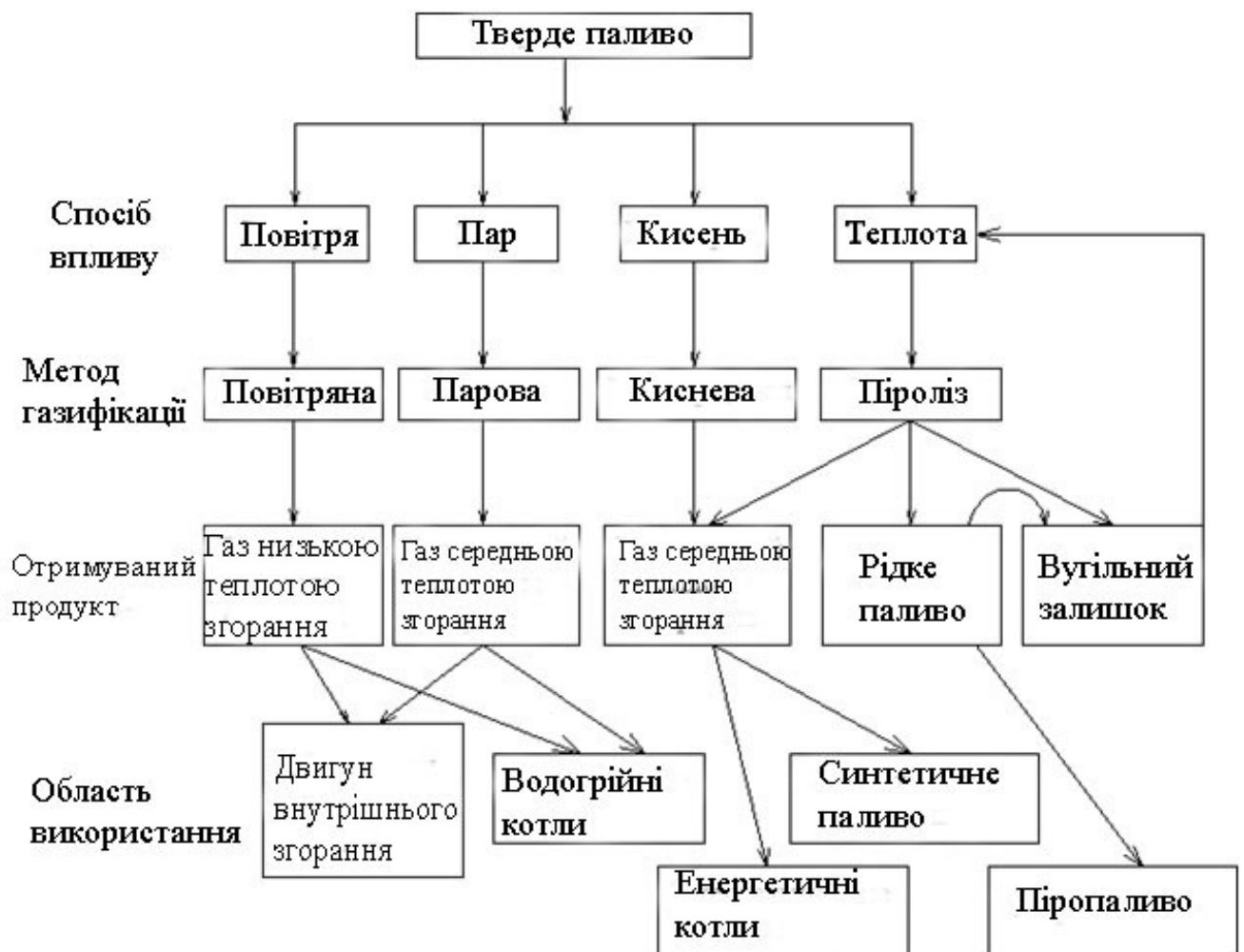


Рис. 1.2. Класифікація різних методів газифікації твердого палива

Оскільки повітря містить 21% кисню, який відповідає за інтенсивність процесу газифікації, температура в реакторі визначається швидкістю подачі повітря і швидкістю подачі палива. Низька швидкість подачі повітря призводить до дуже низької температури шару, меншого виробництва газу і вищого вмісту смоли.

Гази, що утворюються з повітря, мають низьку теплоту згорання 3,5-4,8

МДж/м³ і придатні для використання в котлах і двигунах внутрішнього згоряння. Однак такі гази не придатні для спалювання в камерах згоряння газових турбін або для транспортування трубопроводами на великі відстані.

На відміну від повітряної газифікації, парова газифікація вимагає зовнішнього джерела тепла, коли в якості газифікатора використовується лише пара. У цьому випадку на виході отримують переважно водень, оксид вуглецю і частково вуглекислий газ, змішані з водяною парою. Водяна пара може також значно знизити температуру в зоні відновлення і підвищити теплоємність отриманого змішаного газу за рахунок додаткового виробництва CO і H₂. Отриманий газ називається водяним генераторним газом.

У порівнянні з повітряною газифікацією, парова газифікація виробляє гази з вищою теплотворною здатністю.

Одночасне використання пари і повітря як газифікаторів не є рідкістю. В результаті утворюється суміш газів повітря і води (оксид вуглецю, водень, вуглекислий газ, азот і водяна пара). Ця суміш називається змішаним газом або пароповітряним газом.

У цьому випадку кисень, що міститься в повітрі, допомагає забезпечити енергію, необхідну для екзотермічної реакції горіння палива. Висока температура полегшує процес виділення летких речовин з палива. Пара реагує з монооксидом вуглецю, утворюючи водень і вуглекислий газ. Взаємодія пари з газовою фазою визначається наступною реакцією: $CO + H_2O = CO_2 + H_2$.

Оптимальна кількість пари, що подається в камеру згоряння газогенератора, залежить від кількості тепла, що залишилося після реакції відновлення повітря до газу. Надлишок водяної пари призводить до зниження температури в зоні відновлення, що знижує інтенсивність процесу газифікації і може стати причиною його припинення.

Якщо в якості газифікатора використовується чистий кисень, то продуктивний газ не містить азоту. Такі гази можна транспортувати трубопроводами, використовувати в технологічних процесах або використовувати як сировину для виробництва хімікатів і синтетичного палива. У цьому випадку на самому підприємстві або поблизу нього необхідна

установка, що виробляє чистий кисень. З економічної точки зору, це збільшує капітальні витрати. З іншого боку, теплотворна здатність виробленого генераторного газу становить 10. .15 МДж/м³, що є досить високим показником.

У таблиці 1.2 наведено три типові моделі термічної газифікації твердого палива та відповідні продукти газифікації.

Обов'язковою умовою отримання генераторного газу є запобігання спалюванню отриманого горючого газу. На рисунку 1.3 схематично показано процес, що відбувається в газогенераторі.

Таблиця 1.2

Моделі термической газификации твердого топлива

Модель	Получаемые продукты
Газифікація повітрям	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , N ₂ , смоли. Нижча теплота згоряння газу ~ 3,5...4,8 МДж/м ³ .
Газифікація киснем	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , смоли. Нижча теплота згоряння газу ~ 10–15 МДж/м ³ . Витрати на виробництво та використання кисню компенсуються покращеною якістю генераторного газу.
Газифікація водяною парою	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , смоли. Нижча теплота згоряння газу ~ 12–20 МДж/м ³ . Додавання до пари додаткових горючих компонентів у вигляді водню і кисню призводить до значного підвищення теплотворної здатності, але для підтримки необхідної температури в зоні газифікації потрібна додаткова енергія.

Залежно від того, чи відбувається процес газифікації разом з піролізом або після нього, вуглець палива реагує з різними газовими реагентами (O₂, пара, CO₂, H₂) з утворенням газу, парів смоли і вугільних залишків, включаючи кокс і золу. Реакції в газогенераторах включають наступні типи:



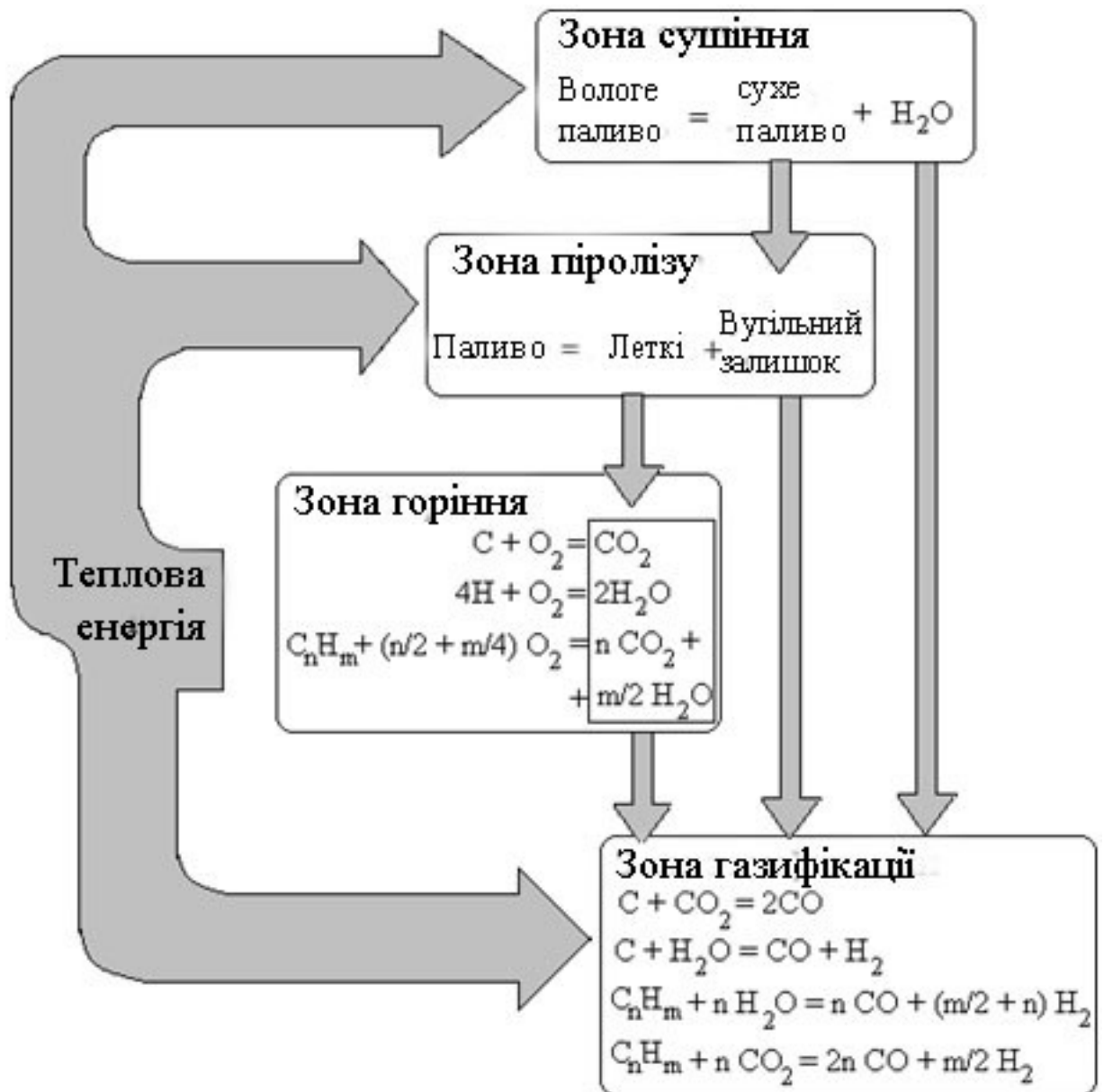
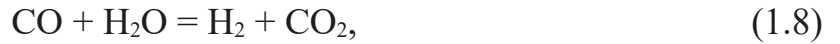
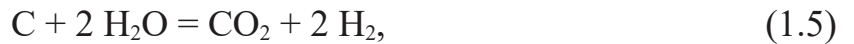


Рис. 1.3. Представлення процесів у газогенераторі

Більша частина кисню, що подається в газогенератор, будь то чистий кисень або кисень повітря, споживається в реакціях (1.1) - (1.3), що призводить до висихання твердого палива, розриву хімічних зв'язків,

підвищення температури в зоні газифікації і вивільнення теплової енергії, необхідної для здійснення реакцій (1.4) - (1.9).

Реакції (1.4) і (1.5) є основними ендотермічними реакціями газифікації, що відбуваються в зонах високої температури і низького тиску.

Реакція (1.6) є основною реакцією при горінні вуглецю, є ендотермічною і протікає набагато повільніше, ніж реакція горіння (1.1) при тій же температурі.

Реакція (1.7), в якій вуглець взаємодіє з воднем з утворенням метану, відбувається дуже повільно, за винятком випадків високого тиску.

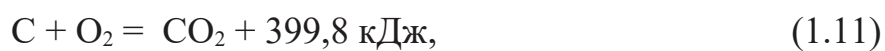
Реакція (1.8) є важливою для виробництва водню.

Тиск не впливає на збільшення виходу H_2 .

Реакція (1.9) є метаногенною реакцією і відбувається дуже повільно за низьких температур.

Реакція (1.10) є відносно нейтральною з точки зору виділення тепла.

Наступні реакції можуть відбуватися для отримання повітряного газу:



Таким чином, у вуглецево-кисневих системах CO і CO_2 утворюються в результаті згорання вуглецю. Перший утворюється в присутності надлишку вуглецю, другий - в присутності надлишку кисню. Перший - у присутності надлишку вуглецю, а другий - у присутності надлишку кисню. У присутності надлишку кисню CO згорає до CO_2 , тоді як останній при нагріванні розкладається до CO і O_2 .

Реакції (1.11) і (1.12) є майже повними, і їх рівноваги не можуть бути проаналізовані безпосередньо. Ці реакції є незворотними, тоді як реакції (1.13) і (1.14) є оборотними.

Реакція $C + O_2 = CO_2$ на $982^\circ C$ протікає миттєво. При низьких температурах її відносна швидкість виражається як $350^\circ C - 1$, $400^\circ C - 10$, $500^\circ C - 200$.

Реакція $C + CO_2 = 2CO$ має велике значення для процесу виробництва енергії: Взаємодія між CO_2 і вуглецем призводить до утворення CO , який збільшується в об'ємі і створює негативний тепловий ефект. Згідно з принципом Ле Шательє, у стані рівноваги при підвищенні тиску реакція повинна рухатися в бік утворення CO_2 і, навпаки, при зниженні тиску вміст CO в рівноважній суміші повинен збільшуватися. Аналогічно, при підвищенні температури реакція повинна рухатися в бік утворення CO і навпаки.

У сумішах, що відповідають складу газів, які еволюціонують, при температурі вище $700^\circ C$ ($^\circ C$) реакція повинна йти в бік утворення CO , а при температурі нижче $700^\circ C$ ($^\circ C$) - в бік розкладання CO . Чим вища температура, тим повніше відновлюється CO_2 ; при $1000^\circ C$ умови сприятливі для майже повного відновлення CO_2 до CO . Зниження тиску призводить до збільшення кількості CO_2 і зменшення кількості CO .

Залежно від методу джерела тепла, необхідного для процесу газифікації палива, розрізняють автотермічні та повністю теплові системи.

У найпоширеніших автотермічних газогенераторах теплота газифікації і частково парогазовий склад середовища, необхідний для процесу, виробляється за рахунок спалювання частини палива всередині газогенератора.

Суто термічний спосіб отримання горючого газу з твердого палива поки що не набув широкого розповсюдження. Він ґрунтується на подачі тепла в зону піролізу і газифікації твердого вугільного залишку або через тверді стінки газогенератора, або шляхом нагрівання частинок сирого палива в газогенераторі за допомогою твердого, рідкого або газоподібного теплоносія. Це робиться для підвищення і підтримки температури газифікації в газогенераторі до бажаної температури. До алотермічних методів також відноситься плазмохімічна газифікація, де тепло забезпечується електроплазмовими нагрівачами. Отриманий горючий газ практично не містить інертних компонентів, таких як атмосферний азот, і має теплоту згоряння 12-21 МДж/нм³.

Більшість сухих дистилятів можна спалювати зі значною теплотою

згоряння, що призводить до конденсації газу і збільшення його теплотворної здатності. Теплота згоряння окремих газів наведена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Молекулярна вага, об'ємна вага та калорійність газів

Найменування речовин	Хімічна формула	Молекулярна вага	Вага газу (кг/м ³)	Теплотворна здатність	
				вищя	нищя
				МДж/м ³	МДж/ м ³
Водень	H ₂	2,016	0,0898	12,8	10,8
Кисень	O ₂	32,000	1,4290	–	–
Азот	N ₂	28,016	1,2510	–	–
Оксид вуглецю	CO	28,010	1,2500	12,6	12,6
Вуглекислота	CO ₂	44,010	1,9770	–	–
Етилен	C ₂ H ₄	28,050	1,2600	62,7	58,7
Метан (болотний газ)	CH ₄	16,040	0,7170	39,8	35,9
Етан	C ₂ H ₆	30,060	1,3560	69,7	63,8
Серчаний ангідрид	SO ₂	64,070	2,9270	4,3	4,3
Серководень (*)	H ₂ S	34,090	1,5390	25,1	23,2
Водяна пара	H ₂ O	18,016	0,8040	–	–
Повітря	-	28,853	1,2930	–	–
(*) при згоранні H ₂ O и SO ₂ .					

З наведеного вище випливає, що теплота згоряння генераторного газу визначається вмістом H₂. Зрозуміло, що найефективнішою роботою газогенератора є така, при якій кількість цих газів у генераторному газі є максимальною. У цьому контексті цікаво визначити межу покращення генераторного газу, змішаного з водяною парою. Ця межа, тобто максимально оптимізований генераторний газ (ідеальний генераторний газ), може бути визначена на основі рівняння теплових ефектів екзотермічних (1.12), (1.14) та ендотермічних (1.13) реакцій.

Загальна кількість молей отриманого газу дорівнює наступному.

$$(2 + 2,02)C + 2,02H_2 + 3,76O_2 = 9,80 \text{ молей.} \quad (1.15)$$

Таблиця 1.4

**Середній склад сухого змішаного газу при пароповітряному дутті,
% (об'ємні)**

Показник	Антрацит	Газове вугілля	Буре вугілля	Торф (кусковий)	Деревина (щепа)
CO	27,5	26,5	30,0	28,0	29,0
H ₂	13,5	13,5	13,0	15,0	14,0
CH ₄	0,5	2,3	2,0	3,0	3,0
C _n H _m	0,0	0,3	0,2	0,4	0,4
CO ₂	5,5	5,0	5,0	8,0	6,5
H ₂ S	0,17	0,3	0,2	0,06	0,0
O ₂	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2
N ₂	52,6	51,9	49,4	45,3	46,9

Ідеальний склад змішаного генераторного газу, коли повітря використовується як окислювач: CO = 41 %, H₂ = 20,6 %, N₂ = 38,4 %. Теплотворну здатність газу можна розрахувати за допомогою наступного рівняння:

$$Q_r = 25,8 H_2 + 30,45 CO. \quad (1.16)$$

Слід зазначити, що азот (N₂), який міститься в повітрі під час вдування, переходить в генераторний газ як баласт і його вміст в ідеальному газі становить 38,4%. Крім того, реальний процес багатьох хімічних реакцій, пов'язаних з піролізом, не дає ідеального генераторного газу в чистому вигляді. У таблиці 1.4, в якій наведено дані для ряду видів палива, показано реальний склад газу.

Використовуючи найпростіше обладнання для налаштування процесу газифікації, неможливо перетворити весь вуглець у паливі на газ, і частина його залишається у вигляді смоли, що ускладнює спалювання та поводження з газом, або перетворюється на шлак чи залишок. У таблиці 1.5 наведено відповідні ідеї щодо стабілізації.

Таблиця 1.5

Баланс вуглецю при газифікації, % (вагові)

Параметр	Антрацит	Газове вугілля	Буре вугілля	Торф (кусковий)	Деревина (щепа)
Частка в газе	94,0	89,0	87,0	86,0	78,0
Частка в смолі	0,0	4,0	5,0	12,5	21,2
Частка в шлаці	2,5	5,0	3,0	0,5	0,3
Частка у виносі	3,5	4,0	5,0	1,0	0,5

Дані, наведені в таблиці, є якісними і можуть дещо відрізнятися залежно від організації процесу та типу установки газифікації.

Якщо замість повітря для продувки використовувати кисень, то вміст азоту в газі, що виробляється, може бути виключений або значно знижений. Але в цьому випадку значно ускладнюються технічна схема і умови експлуатації. У таблиці 1.6 наведено порівняльні дані про теплотворну здатність генераторного газу, отриманого з різними окислювачами. Слід зазначити деяку термінологію. Сьогодні часто плутають терміни "генераторний газ" і "синтез-газ" (мабуть, останній є більш "науковим"). Синтез-газ - це газ з дуже особливим складом:

$$H_2/(2CO + 3CO_2) = 1,05.$$

Оскільки він використовується як сировина для синтезу органічних сполук, вже вироблених з нафти, він повинен бути повністю вільним від домішок (звідси і назва - синтез-газ). Не варто пред'являти аналогічні вимоги до газів, що використовуються як паливо, а також не варто змішувати ці два види. Називати генераторний газ, вироблений з біомаси, біогазом також неправильно. У вітчизняній технічній літературі біогаз - це газ, вироблений з біомаси на основі біотехнології (звідси і назва біогаз). Цей газ принципово відрізняється від газу для виробництва електроенергії, оскільки складається з метану (CH₄). В інших країнах ці поняття об'єднують.

Таблиця 1.6

**Нижча теплота згоряння генераторного газу за різних способів дуття,
МДж/нм³**

Назва газу	Окислювач	Нищя теплота згорання
Повітряний	Поівтря	3,5–4,8
Змішаний	Поівтря + пара	5,0–6,7
Парокисневий	Кисень +пара	10,0–10,5

1.2. Технологічні процеси з використанням газифікації

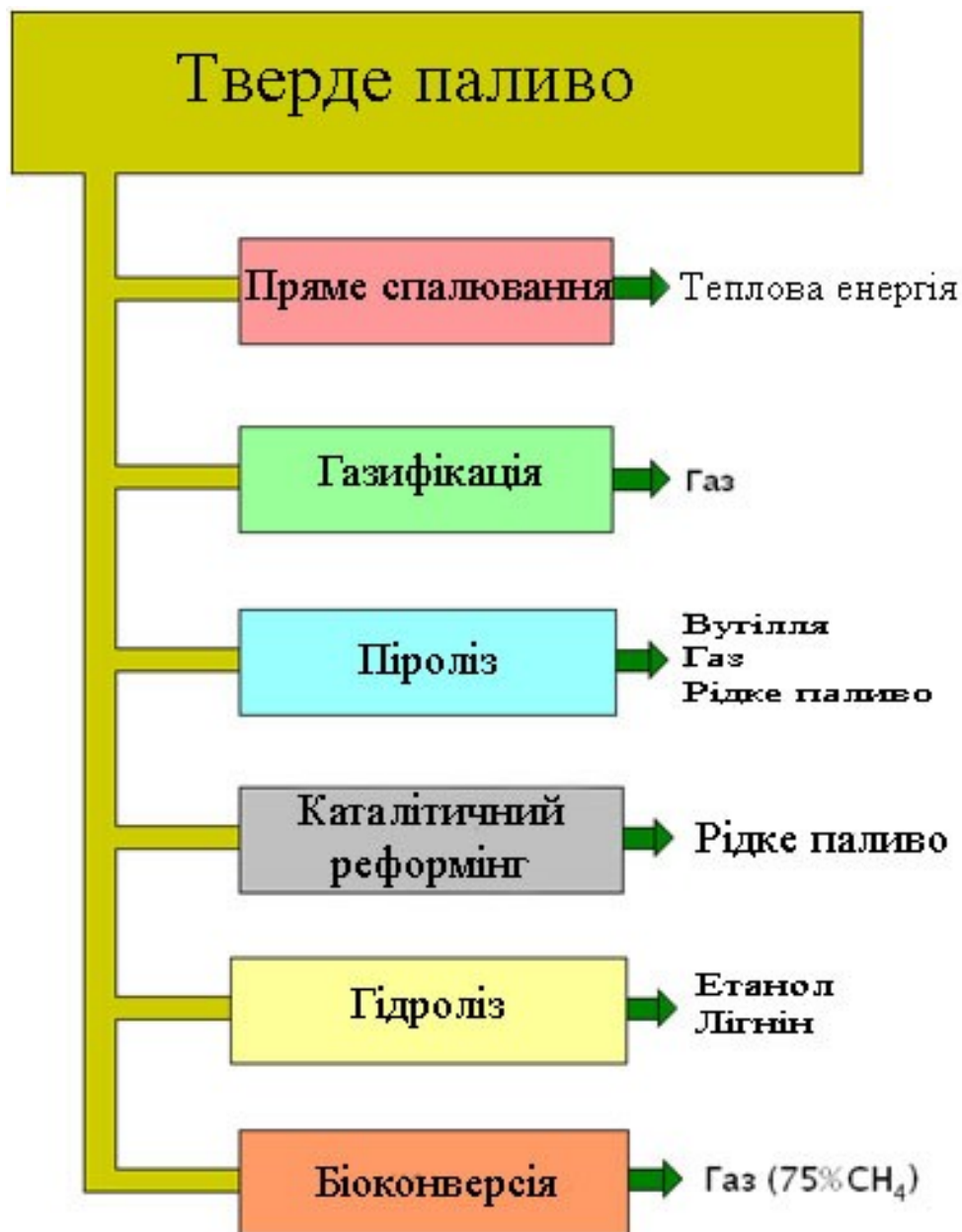
Існує багато способів використання твердого палива в якості енергії. Аналіз технологій, що впроваджуються в даний час, дозволив нам систематизувати дані та виділити кілька основних груп (рис. 1.4).

Процеси газифікації палива подібні до процесів спалювання. Тому конструкція обладнання, за допомогою якого ці процеси реалізуються, також схожа. Існує багато типів обладнання для газифікації.

Процеси газифікації можна покращити шляхом підвищення інтенсивності процесу, збільшення теплотворної здатності газу та збільшення одиничної потужності обладнання. До методів підвищення інтенсивності процесів газифікації відносяться:– веденням процесу за підвищеного тиску (до 2,0–2,5 МПа);

- збільшення реакційної поверхні палива;
- підвищення температури в зоні реакції, оскільки температура в системах рідкого шлаковидалення може досягати 1600°C.

Обладнання, яке здійснює процес піролізу органічних речовин з утворенням газів, що виділяються, називається газогенератором. У криогенних технологіях газифікатори іноді називають "британськими" газифікаторами, оскільки вони відносяться до випарників зріджених газів, що не є кращим варіантом.



**Рис. 1.4. Технології енергетичного використання
твердого палива**

Раніше вже згадувалося, що швидкість нагріву є одним з найважливіших факторів, що визначають кількість і якість продуктів крекінгу під час піролізу. Це один з найперспективніших напрямків розвитку газифікації, який у 1930-х роках (у вітчизняній літературі) отримав назву швидкого піролізу. Сьогодні його також називають флеш-піролізом.

При швидкості нагрівання $103-105^{\circ}\text{C}/\text{сек}$ можна регулювати вихід і склад продуктів піролізу, а також отримувати окремі продукти в чистому вигляді. Основна перевага флеш-піролізу перед звичайним (повільним) піролізом полягає в тому, що він дає високоякісне рідке паливо (піролізат) з

теплотворною здатністю близько 30 МДж/кг при температурах 450-600°C. При цьому вихід піропалива досягає 75% від початкової маси органічної речовини. При температурах близько 1400 °C вихід газоподібних продуктів майже дорівнює органічній масі палива.

Протягом останніх двох десятиліть за кордоном (наприклад, у Канаді, США, Італії, Франції, Фінляндії та Нідерландах) інтерес до флеш-піролізу рослинної біомаси зріс. Запропоновано численні конструкції обладнання з різними вимогами до підготовки палива, різними способами організації паливного потоку, підведення та відведення тепла тощо.

Перше комерційне впровадження технології флеш-піролізу (RTP-технології) в Канаді датується 1989 роком. Наразі подібні заводи працюють у США та Італії. Однак більшість запатентованих технологій ще не досягли комерційного рівня, а існуючі заводи є або пілотними, або демонстраційними.

Передумовою для реалізації процесу флеш-піролізу є забезпечення рівномірної температури частинок палива під час нагрівання, що вимагає подрібнення палива на дуже дрібні частинки. Крім того, вміст вологи в паливних частинках під час флеш-піролізу повинен бути рівномірним і становити близько 12%.

Короткий опис інших технологій, показаних на рисунку 1.4. Розглянемо коротко інші технології, показані на рисунку 1.4.

Каталітичний риформінг - це технологія виробництва рідкого палива з вугілля та твердих відходів з використанням різних каталізаторів. Ця технологія часто поєднується з піролізом і газифікацією. На жаль, для реалізації більшості цих процесів зазвичай потрібен дуже високий тиск. Зокрема:

- розроблено процес зрідження твердого палива гідрогенізацією при тиску водню 6,4 МПа і температурі 350°C. В результаті з 1 тонни біомаси отримують 24 кг синтетичної нафти та 160 кг бітуму;

- у США працює пілотна установка, на якій з 1 тонни деревної тріски при тиску 28 МПа і температурі 350-375°C в присутності каталізатора (карбонату натрію) можна отримати 300 кг палива типу сирової нафти;

- розроблено спосіб термічного зрідження деревини шляхом розчинення її в нафтових фракціях при тиску 10 МПа і температурі 380-450°C;

- в Інституті органічної хімії РАН розроблено технологію отримання рідкого палива з генераторного газу, що вдувається з повітря. Процес каталітичної конверсії генераторного газу відбувається при відносно низькому тиску (0,1-10 МПа) і температурі (200-250°C) у присутності каталізатора. В результаті з 1 тонни сировини отримують 128 кг компонентів моторного палива. Хімічна ефективність цього процесу становить 40%.

Наведені вище (і подібні) технології є багатостадійними і не є економічно вигідними для впровадження на окремих електростанціях. Натомість мова може йти про будівництво великих підприємств і створення спеціалізованих енерготехнологічних комплексів, які поєднують комплексну переробку твердого палива з новими термодинамічними циклами виробництва енергії.

Гідроліз - це технологія, що базується на чергуванні реакцій розкладу між речовинами та водою в присутності каталізатора. Наприкінці 1930-х років у Радянському Союзі була розроблена і широко використовувалася технологія виробництва етанолу (етилового спирту) на основі кислотного гідролізу деревних рослинних відходів. В процесі гідролізу з 1 тонни рослинної біомаси можна отримати близько 160-180 кг спирту і ще 300-400 кг гідролізованого лігніну. Енергоємність аналізованих процесів досить висока і приблизно збалансована з енергоємністю виробленого лігніну.

У багатьох країнах (наприклад, США, Бразилія, Австралія) етанол все частіше використовується як моторне паливо, як у чистому вигляді, так і в суміші (у певних пропорціях) з бензином. При цьому октанове число бензину підвищується на 2-3%. У 1982 році в Бразилії було створено завод з виробництва паливного спирту (етанолу) з евкаліпта за місцевою технологією. Однак через постійно зростаючі екологічні вимоги, пов'язані з виробництвом, серйозним недоліком кислотного гідролізу є велика кількість відходів (переважно рідких). Питання ефективної переробки та утилізації цих відходів досі залишається невирішеним. Тому використання ферментативного гідролізу, який є екологічно чистішим, пропонує додатковий потенціал.

Дослідження в цій галузі були дуже успішними як в Японії, так і за кордоном. Крім того, за кордоном розроблені технології виробництва етанолу з харчової сировини (цукрової тростини, кормових буряків, зернових і харчових відходів).

Біоконверсія базується на використанні видів мікроорганізмів зі спеціальними властивостями, спрямованими на виробництво певних корисних речовин. Такими речовинами здебільшого є паливні речовини, такі як етанол, метанол і метан. Наявні на сьогоднішній день штами мікроорганізмів придатні як для спиртового, так і для метанового бродіння. У першому випадку продуктом життєдіяльності мікроорганізмів є етанол або метанол, у другому - метан. Спиртове бродіння найефективніше відбувається при використанні сировини рослинного походження (цукрова тростина, кормові буряки, пшениця). Метанове бродіння здійснюється з використанням тваринницьких фекалій як сировини. Звичайні процеси ферментації вимагають термостабілізації при температурі 37-40°C, вище якої мікроорганізми гинуть і процес зупиняється. Для метанового зброджування фекалій худоби та птиці були розроблені спеціальні термофільні бактерії, які можуть ферментувати при температурі 50-70 °C. Останні десятиліття 20-го століття стали періодом, коли біотехнологія та генна інженерія стрімко проникли в різні сфери господарської діяльності і вдалося отримати види, здатні до переробки твердого палива. незаперечна.

З точки зору конструкції обладнання процес біоконверсії простіший, ніж гідроліз. Вихід спирту з тонни сухої маси сировини знаходиться в межах 150-200 кг, що майже ідентично технології гідролізу. Як і у випадку з технологією гідролізу, біоконверсія біомаси передбачає утворення значної кількості відходів, які необхідно утилізувати. Наприклад, спиртове бродіння виробляє 8-15 тонн відходів (твердих і рідких) на тонну сировини. Метанове бродіння виробляє дуже мало відходів, оскільки це високоякісне рідке органічне добриво. Єдиним недоліком є те, що воно виробляється в рідкій формі і тому його важко транспортувати.

Слід зазначити, що процеси біоконверсії також застосовуються в

природних умовах. Так званий "звалищний газ" утворюється при розкладанні відходів на звалищах.

На жаль, основний горючий компонент - метан (CH₄), об'ємний вміст якого в звалищному газі становить 40-70%, не утилізується взагалі. Більшу частину газу, що залишається, становить вуглекислий газ (CO₂). Утилізація цього газу сьогодні є серйозною екологічною проблемою.

1.3.Оцінка термічної ефективності газогенератора

Термохімічний ККД використовується для оцінки теплової ефективності газогенераторів:

$$\eta_e = \frac{Q_e V_e}{Q_i^r}, \quad (1.17)$$

Це відношення теплоти, що виділяється при згорянні газу, виробленого з одного кілограма палива, що газифікується, до теплотворної здатності цього палива. Якщо спалювальна установка може використовувати смолу, що утворюється під час газифікації, теплота згоряння смоли і газу підсумовується. У цьому випадку рівняння ефективності виглядає наступним чином:

$$\eta_e' = \frac{Q_e V_e + Q_c V_c}{Q_i^r}, \quad (18)$$

де Q_g і Q_c - відповідно, теплоти згоряння газу та смол; V_g , V_c - відповідно, об'ємний вихід газу та смол з 1 кг палива.

Потужність газогенератора $Q_{ГХ}$ дорівнює виходу хімічної енергії за годину з виробленого газу. Температура газу на виході з газогенератора становить від 200 до 650 °С, залежно від типу процесу. На верхній температурній межі значення $Q_{ГФ}$ може становити до 20 відсотків від значення $Q_{ГХ}$.

1.4.Фізико-технічні характеристики біомаси

Склад, а отже, фізичні та технічні властивості рослинної біомаси змінюються залежно від її походження. Такі властивості біомаси, як вологість і зольність, мають значний вплив на процес газифікації.

Волога може конденсуватися або поглинатися, кількість останньої залежить від вологості навколишнього середовища. У деревині та очереті вміст води може досягати 50%. Сільськогосподарські відходи, такі як солома, містять близько 10-12% води. Вологість знижує ефективність та економічну доцільність використання рослинної біомаси як палива та збільшує транспортні витрати.

Вміст мінеральних речовин у рослинній біомасі сильно варіюється. Деревина містить близько 0,5% золи, що складається в основному з карбонатів, карбоксилатів і невеликої кількості кремнію, тоді як рисова солома містить до 30% золи. Нерозчинні у воді неорганічні сполуки знижують теплотворну здатність біомаси.

Для узагальнення фізико-технічних властивостей різних видів біомаси було використано ряд сільськогосподарських відходів (лушпиння соняшника, рисове лушпиння, дрова, вівсяне лушпиння), гідролізовані промислові відходи (гідролізований лігнін), результати експериментів ВТІ та нові незалежні результати досліджень, що базуються на даних іноземних авторів.

Деревні відходи

Нижче наведені типові характеристики кородревесних відходів Архангельського целюлозно-паперового комбінату.

Враховуючи, що паливо є неоднорідною масою, були визначені середньозважені значення технічних характеристик. Зольність палива визначали за ГОСТ 1.1.022-90, вологість за ГОСТ 27314-91, летючі речовини за ГОСТ 6382-91, вуглець і водень за ГОСТ 24081-88, сірку за ГОСТ 8606-93 і різницю кисню: 1 - сума кожного компонента. Теплота згоряння визначалася згідно з ГОСТ 147-95.

Результати аналізів для розрахунку використаної маси представлені в таблиці 1.7. Елементний склад золи палива визначали згідно з ГОСТ 10538. Результати аналізів представлені в таблиці 1.8.

Склад палива та золи в перерахунку на суху масу для інших ТЕЦ суттєво не відрізняється від наведеного в таблицях 1.7 та 1.8. Вологість коливається в межах 45-60%.

Відходи деревообробних підприємств, як правило, являють собою суху тріску, тирсу та подрібнені відходи. Цей тип відходів є типовим для деревообробних підприємств, що виробляють вікна та іншу високотехнологічну продукцію. Відходи являють собою суху тирсу, стружку та деревну стружку. Виняток становлять відходи шліфування ДСП, які містять абразиви та смоли. Вологість зразків відходів, зібраних у зовнішніх пунктах збору, становить близько 27%, а теплота згоряння - близько 17,2 МДж/кг. Враховуючи, що вологість може зростати восени та взимку, для приблизних розрахунків було використано значення теплоти згоряння палива 16,75 МДж/кг при вологості 10%.

Питома вага зразка становить лише 150 кг/м³. Близько половини відходів є "м'якими" з розміром зерен близько 0,2-1 мм, решта складається з тріски та тирси до 50 мм.

Сільськогосподарські відходи

Теплота згоряння - ГОСТ 147, зола - ГОСТ 11022, вологість - ГОСТ 27314. У табл. 1.9 наведено результати технічного аналізу низки проаналізованих зразків (висушених на повітрі в умовах ґрунту). Очевидно, що в реальних умовах сільськогосподарського виробництва вміст вологи може бути дещо вищим (2-4%), ніж наведено в табл. 1.9, а теплота згоряння відповідно нижчою. Відмінності в зольності визначаються наявністю або відсутністю домішок.

Згідно з літературними даними, найнижча теплота згоряння для аналогічної сировини становить 15,9 МДж/кг соломи льону, 14,3 МДж/кг бавовни (чингарак), 14,5 МДж/кг стебел бавовни (гузопа), 13,3 МДж/кг рисового лушпиння, 15,4 МДж/кг лушпиння соняшникового рису та 15,7 МДж/кг соломи.

Таким чином, теплотворна здатність сільськогосподарських відходів коливається у вузькому діапазоні 13,4-17,1 МДж/кг і є досить високою. Вологість природних відходів становить 10%, а зольність - 5%.

Таблиця 1.7
Фізико-технічні характеристики
кородеревних відходів ЦПК

Найменування	Показник
Вологість, %	47,2
Зольність, %	1,4
Вуглець, %	29,85
Водень, %	1,90
Сірка, %	0,05
Азот, %	0,32
Кисень, %	9,28
Нижча теплотазгоряння, МДж/кг	8770

Таблиця 1.8
Елементарний склад золи
Сполука

	Кількість, %
SiO ₂	26,58
TiO ₂	0,74
Al ₂ O ₃	4,7
Fe ₂ O ₃	3,97
CaO	44,96
MgO	6,12
SO ₃	0,14
Na ₂ O+K ₂ O	Менше 12,8

Відходи мають теплотворну здатність близько 15,5 МДж/кг, вологість 8% і зольність 3%.

Таблиця 1.9
Фізико-технічні характеристики сільськогосподарських відходів

Показник	Вид відходів			
	Багаття (канатна фабрика)	Лузга соняшника (Пологи)	Лушпиння вівса	Лушпиння проса
Вологість, W^r , %	7,2	8,11	10,0	6,4
Зольність, A^r , %	2,0	2,17	4,5	9,0
Теплота згорання Q^r , МДж/кг	15,9	17,1	14,7	15,4

Елементний склад відходів представлено в таблиці 3.4. Вуглець і водень були проаналізовані згідно з ГОСТ 2408, азот - згідно з ГОСТ 28743, а сірка - згідно з ГОСТ 8606.

Елементний склад відходів подібний з вмістом вуглецю близько 50% і кисню 42%. Через низький вміст сірки та помірний вміст азоту викиди сірки та закису азоту навряд чи перевищать 600 мг/м³ за будь-якої технології спалювання. Слід також зазначити, що ці сільськогосподарські відходи є високореактивним паливом з високим вмістом летких сполук (близько 80%).

Таблиця 1.10

Елементарний склад сільськогосподарських відходів

Показник	Вид відходів		
	Багаття (канатна фабрика)	Лузга соняшника (Пологи)	Лушпиння проса
Вуглець, С, %	49,4	51,3	42,9
Сірка, S, %	0,2	0,1	0,2
Водень, Н, %	6,3	6,6	5,6
Азот, N, %*	0,6	1,4	51,3
Кисень, О, %	43,5	40,6	51,3

* через високий вміст лужних елементів у золі, відсотковий вміст азоту може бути дещо заниженим.

Елементний склад золи був визначений згідно з РД 34.44.301-96. У таблиці 1.11 наведено склад золи.

Таблиця 1.11

Склад золи сільськогосподарських відходів

Склад золи, %	Багаття (канатна фабрика)	Лузга соняшника (Пологи)	Лушпиння вівса	Лушпиння проса
SiO ₂	39,5	–	75	86,8
TiO ₂	< 0,1	–	–	–
Al ₂ O ₃	2,6	–	–	0,6
Fe ₂ O ₃	7,7	–	–	0,2
CaO	30,6	–	3,0	0,6
MgO	6,9	–	8,5	1,8
K ₂ O	9,2	20,05	10,5	6,2
Na ₂ O	0,8	0,47	2,0	2,0
SO ₃	2,6	–	–	1,8

На відміну від органічної речовини, склад мінеральної фракції сильно варіює. Особливо це стосується оксиду кремнію (40-87%), заліза (0,2-7,7%), кальцію (0,6-30,6%) і калію (6,2-20%). На всі елементи, крім

лужності, забруднення поверхні нагріву суттєво не впливає.

Температура розм'якшення золи (після озолення в муфелі) становить близько 1300 °С (1200 °С - 1400 °С).

Лігнін.

Лігнін - це складна трифазна полідисперсна система, що складається з твердої фази, води і повітря. Частинки технічного лігніну мають розмір від декількох сантиметрів до одного мікрона або менше і в основному витягнуті з коефіцієнтом подовження 2,2-2,4.

Лігнін, отриманий шляхом кислотного гідролізу, містить власне лігнін (40-88%), а також важкогідролізовані полісахариди (13-45%), смоли (лігногумінові комплексні речовини) (5-19%) і золу (0,5-10%).

Вологість природно-гідролізованого лігніну зазвичай становить 65-68%, але в деяких випадках може досягати 70% і більше.

Слід зазначити, що лігнін зберігає більшу частину сонячної енергії, поглиненої рослинами під час росту. Наприклад, у хвойних дерев, що містять 42% целюлози, 27% геміцелюлози, 28% лігніну і 3% ліпідного екстракту, внесок лігніну в теплотворну здатність становить 39%, целюлози 34% і геміцелюлози 2%.

Хоча вищезазначені властивості лігніну є, з одного боку, дуже привабливими для газифікації (Таблиця 1.12), з іншого боку, виникають певні технічні труднощі. Наприклад, при вологості 68-69% лігнін втрачає плинність і прилипає до поверхні контакту. Тому необхідна попередня сушка.

Під час сушіння, однак, відбуваються значні зміни у складі лігнінової паливної маси через зменшення вмісту летких речовин в результаті піролізу. Особливо страждають більш легкі частинки (рис. 1.5).

Також було встановлено, що піроліз починається при досягненні певного порогового вмісту вологи $W_{гр}$. Ця вологість $W_{гр}$ є дещо нижчою за критичну вологість $W_{кр}$ і відповідає закінченню періоду постійної (максимальної) швидкості сушіння.

Дериватологічний аналіз показав, що початок піролізу летких речовин лігніну відповідає нагріванню поверхні частинок до 140-143 °С. Енергія активації летких речовин лігніну становить 36,9-103 Дж/моль. Піроліз лігніну відбувається при більш високих температурах.

Таблиця 1.12 $\Delta V_{\text{летуч.}}^c, \%$

Газифікаційні характеристики лігніну

Характеристики	Лігнін	
	дерев-ний	из с/госп відходів
Робоче паливо		
Q^r , МДж/кг	21,762	19,211
W^p , %	3,7	4,0
A^p , %	3,2	18,4
$S_{\text{об}}^p$, %	0,3	0,3
C^p , %	57,3	51,8
H^p , %	5,4	4,1
$O^p + N^p$, %	37,0	43,8
Суха маса палива		
$Q_{\text{в}}^c$, МДж/кг	23,958	21,025
A^c , %	3,35	19,0
$S_{\text{об}}^c$, %	0,3	0,3
C^c , %	59,5	54,0
H^c , %	5,54	4,3
$O^c + N^c$, %	34,7	41,4
Горюча маса палива		
$Q_{\text{в}}^r$, МДж/кг	24,784	26,016
S^r , %	0,31	0,4
C^r , %	61,6	66,6
H^r , %	5,8	5,3
$O^r + N^r$, %	32,3	27,7
V^r , %	70,4	57,2

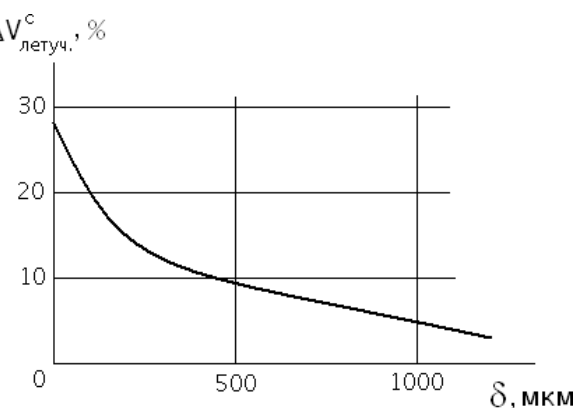


Рис. 1.5. Залежність втрати летких речовин (за сухою масою) від розміру частинок лігніну при початковій вологості лігніну 55-60%

Торф.

Торф - це продукт розкладання рослинних решток і елементів рослин, які ще не розклалися, причому ступінь розкладання зростає з глибиною залягання торфу. Торф буває верховий, низинний і змішаний.

У природному стані торф сильно перезволожений і повинен бути попередньо висушений. Вологість торфу в повітряно-сухому стані

становить 15-25%.

Слід також зазначити, що торф містить значну кількість (до 36%) мінеральних речовин. Це осадові залишки і рослинні мінеральні солі. Склад мінеральної частини торфу має значний вплив на процес газифікації.

Середній елементний склад торфу становить 3,4-9,4% N, 54-60% C, 0,5-3,0% H, 28,5-39,5% O₂ і 0,1-1,5% S.

Теплота згоряння торф'яного палива коливається в широкому діапазоні від 19,7 до 25,1 МДж/кг.

Процес піролізу торфу подібний до процесу горіння деревини. Молодий торф має склад дистильованих продуктів, близький до деревини, тоді як старий торф ближчий до бурого вугілля. При нагріванні торфу до температури 100 °C відбувається процес сушіння. Потім починається фаза піролізу, в якій спочатку виділяються CO₂ і H₂O. Найбільш інтенсивне розкладання на газоподібні компоненти починається при температурі 150 °C. У таблиці 1.13 наведено дані про склад продуктів розкладання торфу за різних температур.

Таблиця 1.13

Продукти розкладання торфу за різних температур

Вихід продукта (на суху масу)	Температура, °C			
	350	400	450	520
Смола, %	6,82	17,45	20,80	21,10
H ₂ O, %	8,07	14,00	15,86	17,0
Газ, %				
CO ₂	82,0	77,9	72,3	63,4
C _m H _n	–	0,6	1,6	2,62
CO	–	40,6	15,4	16,54
Напівкокс	76,3	54,0	46,35	41,30

Деревина

У цьому розділі наведено дані про склад (табл. 1.14) та фізичну структуру деревини. Для прикладу наведено два види деревини - хвойні та листяні породи.

Слід зазначити, що деревина має різні коефіцієнти розширення вздовж різних просторових осей. Наприклад, деревина сосни

розширюється вздовж волокон у 20 разів. Тому при нагріванні до температур піролізу в структурі деревини виникають напруження і утворюються макро- та мікротріщини. Ці тріщини швидко підвищують температуру і збільшують реакційну поверхню деревини, прискорюючи процес сушіння. Виділяються леткі гази і пари, в тому числі вуглеводневі сполуки, чадний газ, водяна пара, смоли і бензол. Залишаються тверді залишки вуглецю.

Таблиця 1.14

Склад деревини

Порода деревини	Зола, %	Склад, %			
		Речовини, нерозчинні у воді	Лігнін	Геміцелюлоза	Целюлоза
Хвойна	0,4	2,0	27,8	24,0	41,0
Твердолистова	0,3	3,1	19,5	35,0	39,0

Відсотковий вміст летких компонентів дуже важливий для режиму горіння твердого палива. У літературі на цю тему можна знайти різні дані. Значення варіюються в широкому діапазоні 65-87% (об'ємних). Різниця може бути пов'язана з різними методами дослідження, такими як температура піролізу та час перебування частинок в атмосфері.

Також було досліджено енергетичне використання твердих побутових відходів, включаючи медичні відходи та шлам целюлозно-паперових комбінатів. Ці відходи відрізняються різноманітними властивостями, морфологічним складом, нестабільністю і часто наявністю небезпечних речовин (які виключають можливість спалювання). Тому застосування цього виду палива.

2. Типи газогенераторних установок

Теорія і проектування ендотермічних методів отримання газоподібного палива з твердої сировини розроблені в значно меншому ступені, ніж екзотермічні методи газифікації.

Залежно від організації подачі окислювача і гранулометричного складу сировини, методи газифікації біомаси, що самонагрівається, включають наступні методи

- а) методи газифікації в герметичних утвореннях
- б) методи газифікації в псевдозрідженому шарі
- в) методи газифікації в пилових потоках.

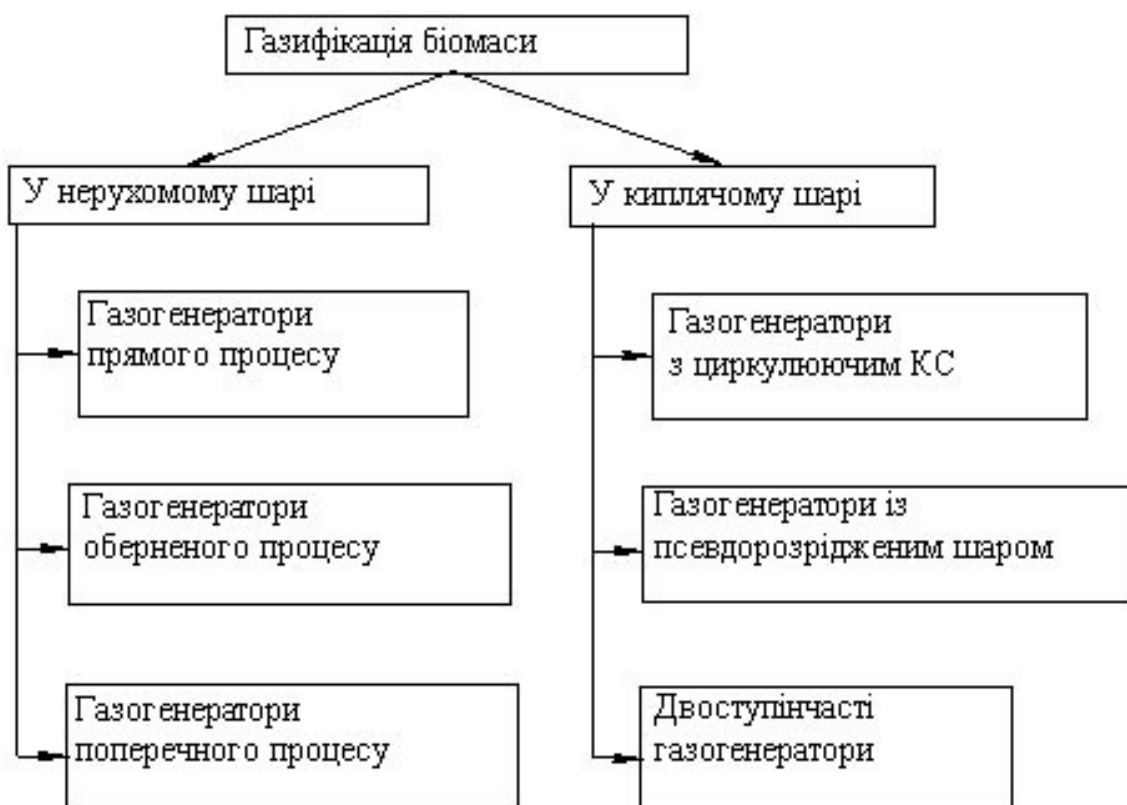


Рис. 2.1. Методи технологій газифікації біомаси

На сьогоднішній день існує близько 25 технологій газифікації

біомаси (рис. 2.1) і, відповідно, велика кількість газогенераторів різних розмірів.

2.1. Схеми газифікації в щільному шарі

При газифікації палива в щільних шарах сировина подається зверху відносно великими шматками в газогенеруючу шахту, де проходить стадії сушіння, піролізу і газифікації. Цей тип реактора заснований на опусканні палива в шахту під дією сили тяжіння. Час сушіння, піролізу і газифікації залежить від типу, складу і вологості палива, що визначає розмір (висоту) кожної зони і загальну висоту шахти газогенератора. Завдяки тривалому часу перебування палива в шахті газогенератора і низькому рівню викидів газу, використання стратифікованих газогенераторів є переважним для установок малої потужності (до 5 МВт).

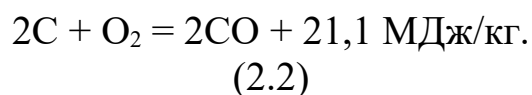
Залежно від місця подачі повітря або кисню в шахту і місця виходу газу з шахти генератора щільного стратифікованого газу розрізняють три типи газогенераторів:

- газогенератори прямої газифікації
- газогенератори зворотної газифікації.
- газогенератори перехресної газифікації.

Всі газогенератори мають чотири зони:

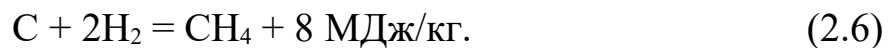
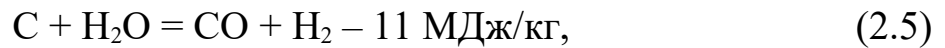
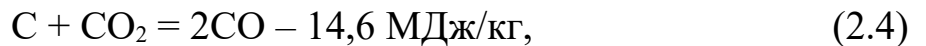
- зона спалювання
- зона газифікації
- зона піролізу.
- зона сушіння.

У зоні горіння виділяється тепло, в той час як інші зони поглинають тепло. Дві основні екзотермічні реакції в зоні горіння:



У зону газифікації надходять гази із зони горіння, які вступають у

реакцію з вуглецем і водяною парою палива. В результаті цієї взаємодії утворюються горючі компоненти: CO, H₂ та CH₄. Реакції в зоні газифікації є оборотними та ендотермічними, за винятком метаногенної реакції (2.6). Найважливішими реакціями в зоні газифікації є



У зоні піролізу реакції окислення не відбуваються через відсутність вільного кисню в повітрі і недостатню кількість тепла, необхідного для піролізу палива. У цій зоні виділяються леткі речовини і смоли. Оскільки біомаса завжди містить певну кількість вологи, при завантаженні в реактор вона спочатку проходить через зону сушіння. Щоб почати піроліз біомаси, вся вода, що міститься в біомасі, повинна випаруватися.

Хоча в газогенераторі немає кисню, частина чадного газу (CO) і водню (H₂), що утворюється, окислюється. В результаті утворюється тепло, необхідне для процесу газифікації. Кількість тепла, необхідного для газифікації, є меншою, ніж теплота перегріву виробленого газу. Реакція окислення відбувається наступним чином:



Коефіцієнт надлишку повітря є важливим для процесу газифікації і визначається наступною залежністю

$$\alpha = \frac{m_{\text{O}_2} / m_{\text{біом}}}{\left(m_{\text{O}_2} / m_{\text{біом}} \right)_{\text{ст}}},$$

де m_{O_2} , $m_{\text{біом}}$ — відповідно витрата кисню та біомаси в газогенератор;

$(m_{\text{O}_2} / m_{\text{біом}})_{\text{ст}}$ — співвідношення кількості кисню, що подається, і біомаси при стехіометричних умовах, коли здійснюється процес горіння.

Коефіцієнт надлишку повітря вказує на те, чи є реакція піролізом ($\alpha = 0$) або газифікацією ($\alpha < 0 < 1$) або горіння ($\alpha > 1$). Як згадувалося вище, процеси газифікації зазвичай мають $\alpha = 0,2 \dots 0,4$. За цих умов все тверде паливо перетворюється на газ, який має найвищу теплотворну здатність. Зі збільшенням α утворюється більше вуглекислого газу (CO_2) і водяної пари (H_2O), а теплота згорання паливного газу відповідно зменшується.

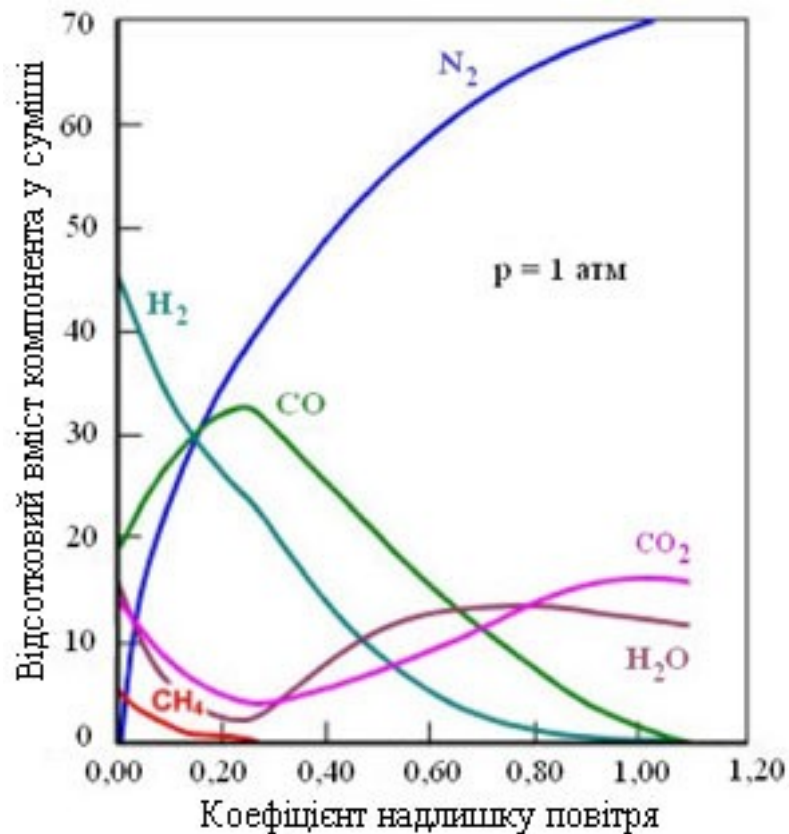


Рис. 2.2. Залежність складу одержуваного газу від коефіцієнта надлишку повітря

При газифікації в нерухомому шарі вибір швидкості надлишку повітря є непростим завданням. Просте збільшення швидкості вдування дасть необхідні результати для заданого значення α . В той же час, збільшення об'єму подаваного повітря призводить лише до збільшення швидкості потоку біомаси до газогенератора [5].

Таким чином, співвідношення $m_{\text{O}_2} / m_{\text{біом}}$ залишається незмінним.

Склад генераторного газу залежить від ряду параметрів, включаючи тип газогенератора, паливо, що використовується, вміст води в паливі та

коефіцієнт надлишку повітря На рисунку 2.2 графічно показано залежність складу генераторного газу від коефіцієнта надлишку повітря при продувці повітря в реверсивному газогенераторі На рисунку 2.2 графічно показано залежність складу газу, що утворюється при продувці повітря в реверсивному газогенераторі, від коефіцієнта надлишку повітря.

Як видно з цього рисунку, при $\alpha = 0,25$ газ містить найбільшу кількість оксиду вуглецю (CO) і найменшу кількість діоксиду вуглецю (CO₂). Теплота згоряння є найвищою, оскільки вся біомаса перетворюється з твердої фази в газову, а продуктивний газ ще не окислений і не розбавлений азотом.

Конструктивно генератор стратифікованого газу зазвичай являє собою шахту, внутрішня стінка якої футерована вогнетривким матеріалом. Як згадувалося вище, паливо засипається з верхньої частини шахти, а дуття подається з нижньої частини. Паливний шар підтримується колосниковою решіткою. Процес виробництва газу в паливному шарі показаний на рисунку 2.3.

Подане дуттьове повітря проходить через золошлакову зону 0, де злегка нагрівається перед тим, як потрапити в гарячий шар палива (зона окислення або зона горіння I), де кисень дуттьового повітря вступає в реакцію з горючими компонентами палива. Піднімаючись через газогенератор і контактуючи з гарячим паливом (зона газифікації II), утворені продукти згоряння відновлюються до оксиду вуглецю і водню. Оскільки високотемпературні продукти відновлення продовжують рухатися вгору, паливо піддається піролізу (зона розкладання палива III), а продукти відновлення збагачуються продуктами розкладання (газ, смола і пара).

В результаті розкладання палива утворюється напівкокс, потім кокс, а продукти згоряння відновлюються в міру зниження температури на

поверхні (зона II). Опускаючись вниз, кокс згорає (зона I). Нагорі тепло від висхідних газів і парів сушить паливо.

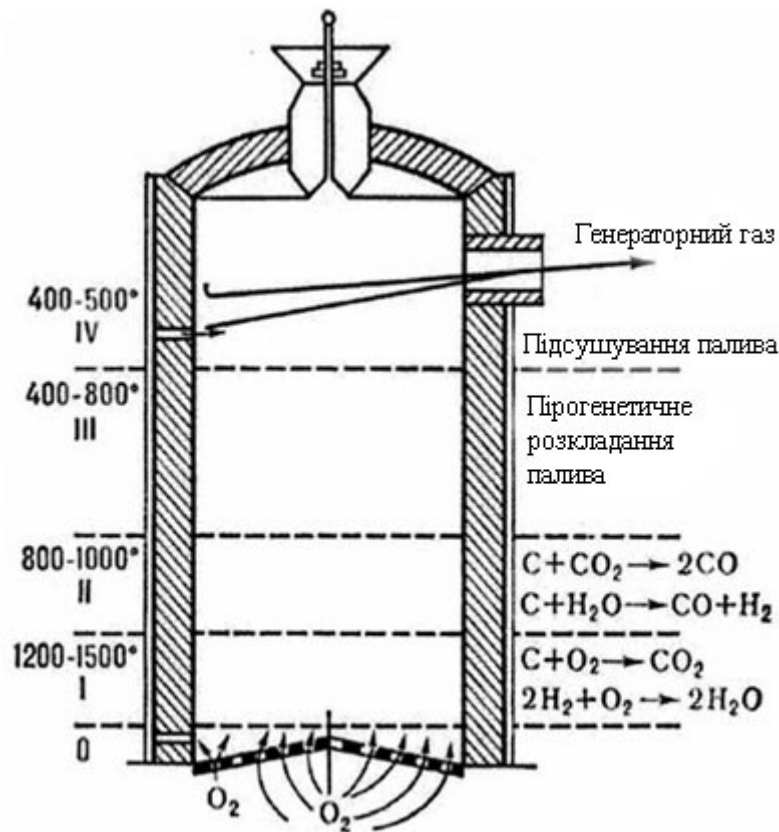


Рис. 2.3. Процеси утворення газів у шарі палива

Газогенератори прямого процесу

Генератори прямого технологічного газу є найстарішими і найпростішими пристроями, розробленими як для газифікації біомаси, так і для газифікації вугілля (Рис. 2.4).

У процесі прямої газифікації вироблений газ виходить у верхній частині шахти і подається в нижню частину шахти газогенератора, де відбувається спалювання залишків вугільного палива з виділенням тепла і продуктів згоряння (CO_2 , H_2O).

Продукти згоряння проходять знизу вгору вздовж усього шару палива в газогенераторній шахті і піддаються послідовному процесу газифікації і піролізу кутового залишку. Продукти газифікації (CO , H_2 , CH_4) таким чином збагачуються і утворюють злегка охолоджену газову суміш, яка проходить через центр шару палива в газогенераторній шахті,

де відбувається піроліз сухих частинок палива і виділяються різні продукти піролізу (кислоти, смоли, гази). Крім того, хімічно активна парогазова суміш продуктів згоряння, газифікації та піролізу (генераторний газ) проходить через верхній шар палива, де вона висушується, збагачується вологою і охолоджується перед виходом з верхньої частини газогенераторної шахти. Температура газу, отриманого в результаті газифікації біомаси, коливається в межах 100-300°C, залежно від характеристик сировини.

Основними перевагами таких газогенераторів є простота, висока швидкість згоряння палива, високий ККД та можливість використання палива з різною вологістю та фракційним складом. При виході з газогенератора зола повністю окислюється і не містить незгорілого вуглецю. Вміст пилу в паливному газі низький завдяки низькій швидкості на виході з обладнання, а також "фільтруючому ефекту" газу в зоні сушіння та піролізу.

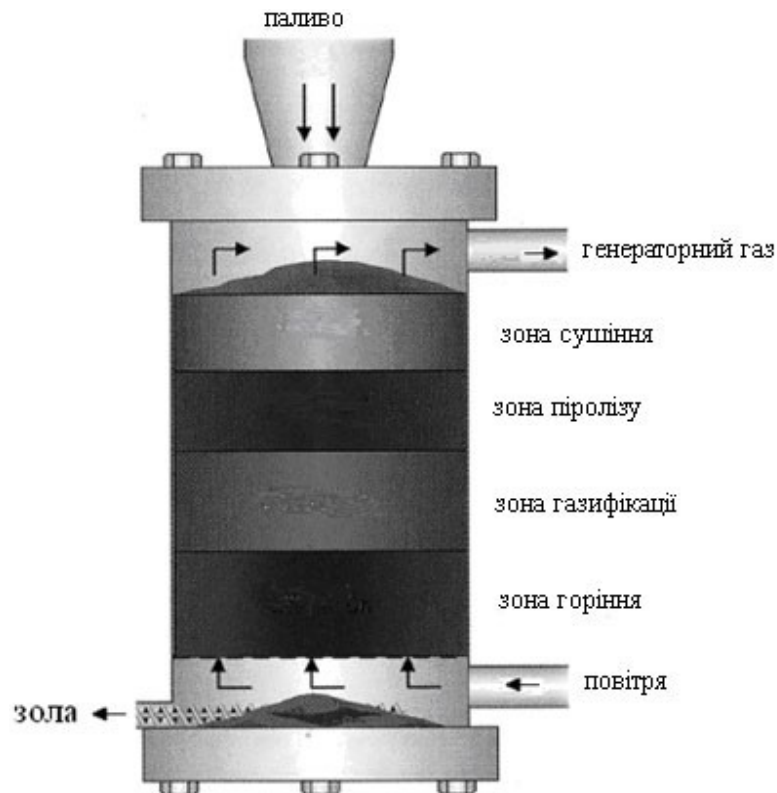


Рис. 2.4. Слойовой газогенератор прямого процесса газификации

Основним недоліком є високий вміст смоли у видобутому газі. Це пов'язано з тим, що процес відбору газу відбувається над зоною сушіння палива, де концентрація смоли найвища.

Існує багато конструктивних варіантів газогенераторів шарового методу, що використовують прямий метод газифікації: Газогенератор Bioneer компанії Ahlstrom - одна з найвідоміших установок технології газифікації з нерухомим шаром. Такі установки експлуатуються у Фінляндії та Швеції з середини 1980-х років.

Газогенератор «Bioneer»

Газогенератор - це шахтна піч, яка отримує паливо зверху через газонепроникний живильник. Шахта викладена вогнетривкою цеглою і покрита ізоляцією. Зволожене повітря подається в нижню частину шахти через конічну решітку, що обертається. Утворений газ піднімається вгору проти потоку палива і виводиться через трубу у верхній частині газогенератора. Залишковим продуктом процесу газифікації є зола, яка вивантажується на конвеєр за допомогою шлюзового живильника. Температура над колосниковою решіткою підтримується на рівні 900-1200°C, щоб запобігти утворенню шлаку в зоні горіння. Ця температура регулюється кількістю пари, що додається до дуттьового повітря в залежності від температури плавлення золи палива. Теплова потужність таких генераторних газоспалювальних установок коливається в межах 1-10 МВт при габаритних розмірах 22-51 м в діаметрі, 95-11 м у висоту і 19-34 т у вазі.

Газогенератори Bionia призначені для виробництва горючого газу з різних видів твердого палива для спалювання в топках парових і водогрійних котлів, для виробництва осушувача в різних конвективних сушарках і для використання в печах регенерації вапна. Горючі гази містять значну кількість смоли і не можуть використовуватися

безпосередньо в двигунах внутрішнього згоряння, а також не придатні для транспортування трубопроводами на великі відстані.

В середині 1980-х років фінські дослідницькі інститути VTT і Bioneer Oy провели випробування газифікації на різних видах сировини, включаючи деревну тріску, відходи лісозаготівлі, торф, соломку, пелети з горючих фракцій твердих побутових відходів, суміші вугілля з деревною тріскою і суміші твердих побутових відходів і деревної тріски. Дослідження проводилися в пілотному газогенераторі Bioneer потужністю 1,5 МВт. Вміст парів у повітрі вибуху становив 0,15... 0,19 кг H₂O/кг сухого повітря. Під час випробувань потужність газогенератора змінювалася від 50% до 100% від номінальної. Типовий склад генераторного газу під час роботи на деревній трісці вологістю 41% наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Типовий склад генераторного газу при роботі на трісці вологістю 41 %

CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	Q^{r_s}	Смоли
% (об.)					МДж/нм ³	г/нм ³
30	11	3	7	49	6,2	50...100

У 1985-1986 роках, коли ціни на нафту були високими, було побудовано і введено в експлуатацію дев'ять електростанцій Bionair потужністю 4-5 МВт: п'ять у Фінляндії і чотири у Швеції. Чотири з них працювали на деревині або суміші деревини і торфу, а решта - виключно на торфі; вісім газогенераторів працювали як частина теплових електростанцій, а одна була поєднана з сухою піччю.

Електростанції, які зараз працюють на газогенераторах Bioneer, забезпечують теплом регіон, спалюючи вироблений газ у топках водогрійних котлів. Ці газогенератори повністю автоматизовані, можуть гнучко адаптуватися до характеристик сировини (фракційний склад, вологість) і є економічно вигідними.

Потреба в паливі.

- Вологість < 50%;
- Зольність < 10%;
- Мінімальна температура розм'якшення золи > 1190 °С.

У 1998 році компанія VTT збрала та проаналізувала дані про роботу газогенераторів Bioneer на теплових електростанціях. Результати показали, що на практиці такі газогенератори використовують сировину з вологістю менше 45% при нормальній роботі і менше 40% при тривалій роботі газогенератора на максимальному навантаженні. Якщо ці умови не виконуються, згоряння газів газогенератора з високим вмістом парів смол і вологи стає нестабільним.

Вимоги до якості сировини для газогенераторів Bioneer відповідають режиму використання виготовленого газогенератора (спалювання в котлі). Найбільш підходящим паливом є деревна тріска, але розпил будівельної деревини для газифікації може викликати проблеми. Крім того, смола, що міститься в виробленому газі, призводить до закупорки каналів, що з'єднують газогенератор з котлом. Як наслідок, ці канали потрібно часто чистити. Наприклад, на фінській теплоелектростанції з газогенераторами виробництва Bioneer газоходи очищають кожні два-шість тижнів, залежно від характеру сировини і потужності газогенератора.

Процес «Purox»

Американська компанія Union Carbide розробила технологію переробки побутових і промислових відходів у паливний газ середньої теплотворної здатності. В основі процесу Purox лежить процес пошарової прямої газифікації з використанням чистого кисню для спалювання. Отриманий паливний газ не розбавляється азотом і має високу теплотворну здатність - приблизно 11,8-15,4 МДж/нм³. Склад і якість паливного газу залежить від складу і вмісту води в перероблюваних відходах. Продуктовий газ виводиться з реактора при температурі 100-

310 °С. Продуктовий газ може використовуватися безпосередньо як паливо для спалювання в котельних, обпалювальних і нагрівальних печах, а також як паливо для виробництва хімічних продуктів, таких як метанол, аміак і рідке вуглеводневе паливо.

У процесі Ригох висока температура 1500 °С в зоні горіння газогенераторної шахти необхідна для видалення рідкого шлаку. Розплавлений шлак у нижній частині шахти скидається в резервуар, де він гранулюється. Горючі гази, що виводяться з верхньої частини газогенераторної шахти, сильно забруднені летучою золою, парами смол, органічними рідкими кислотами та ароматичними вуглеводнями і повинні бути ретельно очищені.

Газогенератори спочатку були спроектовані для спалювання неперероблених твердих відходів. Однак під час експлуатації було виявлено, що більш високої продуктивності можна досягти, спалюючи подрібнені відходи.

Процес Ригох реалізується за допомогою трьох окремих блоків: блок попередньої обробки сировини, блок газифікації та блок виробництва кисню.

Газогенератор Г-3 «СПБГПУ»

Газогенератор Г-3 розроблений на замовлення Пологівського олійноекстракційного заводу (Україна). Він призначений для газифікації лушпиння соняшника та відходів олійноекстракційного заводу. Оскільки основним паливом є лушпиння соняшника, були отримані експериментальні дані по газифікації дрібнодисперсної сировини, деякі з яких представлені в таблиці 2.2.

Характеристика продуктів на виході із газогенератора:

- а) Склад одержуваного сухого газу, % (об.): CO_2 — 7,0; H_2 — 15,1; CO — 27,6; C_nH_m — 2,2; N_2 — 48,1.
- б) Парів смол на кг сухого лушпиння 14 %.

- в) Пилоподібних частинок у газі до 5 г/м^3 .
- г) Парів кислот на кг сухої лушпиння (у перерахунку на оцтову кислоту) 6%.
- д) Вологість газу залежить від вологості вихідного палива і становить близько 10 % (об.) при вологості сировини 10 %.
- е) Для спалювання генераторного газу потрібно близько 1 м^3 повітря.
- ж) Температура горіння генераторного газу в повітрі $1500 \text{ }^\circ\text{C}$.
- з) Склад золи: SiO_2 - 9,9; Na_2O - 0,8; CO_2 - 5,6; CaO - 17,1; CO_3 - 2,4; Al_2O_3 - 5,3; Li_2O - 0,3; MgO - 22,1; Fe_2O_5 - 1,8; K_2O - 25,9; P_2O_5 -8,8.

Таблиця 2.2

Характеристика лушпиння насіння соняшника

Характеристика	Значення
Відносна вологість, %	7–12
Зміст летких, %	71,0
Вміст фракцій менше 5 мм, %	не більше 30
Вміст нелетючого вуглецю, %	15,4
Зольність, %	1,9–2,0
Найнижча теплота згоряння, МДж/кг	15,7
Середній розмір (довжина×ширина×товщина), мм	10×4×0,2
Насипна густина, кг/м^3	90–120
Уявна питома вага, кг/м^3	460
Порізність шару, %	76,1

Газогенератор Г-3 (рис. 2.5) працює за прямим процесом; газогенератор Г-3 складається з валу газогенератора, вузла подачі палива, вузла золовидалення, системи подачі повітря, системи відбору газу, контрольно-вимірювальних приладів і системи управління. Основні характеристики газогенератора наведені в таблиці 2.3.



Рис. 2.5. Газогенератор Г-3

Шахта газогенератора складається з корпусу, всередині якого знаходиться несучий пояс, що утримує футеровку з вогнетривкої цегли. Кожух складається з двох циліндричних патрубків різного діаметру, з'єднаних конічним патрубком. Кожух має ребра (12) для підведення пари і ніші для датчиків температури в трьох зонах розміщення, спалювання і рекуперації золи. Верхня кришка топки обладнана системою подачі палива, паливним змішувачем, системою контролю рівня палива, відводом паливних газів з пластинчастим клапаном, відводом газів при розпалюванні і кришкою для огляду топки. Мембрана детонаційного клапана виготовлена з алюмінієвої фольги товщиною 0,3 мм. Змішувач оснащений власним приводом, що складається з електродвигуна потужністю $N = 3$ кВт і частотою обертання $n = 1500$ об/хв і двох редукторів з передавальним числом $Z = 100$.

Завантажувальний пристрій також має власний привід: Електродвигун потужністю $n = 3$ кВт і частотою обертання $n = 1500$ об/хв та редуктор з передавальним числом $Z = 40$.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики газогенератора

№	Показники роботи	Одиниці	Значення
1	Номінальна теплова потужність зі спалювання газу	МВт	5,0
2	Номінальна продуктивність газу (сухого)	м ³ /ч	3200
3	Номінальна витрата лушпиння при вологості 12%	кг/ч	1250
4	Теплота згоряння сухого газу	МДж/кг	5,9
5	Номінальна витрата повітря на фурми на колосники	м ³ /ч	1500 500
6	Робочий тиск у шахті	кПа	1,5
7	Номінальна витрата пари	м ³ /ч	200
8	Температура газу на виході із газогенератора	°С	350
9	Коефіцієнт корисної дії	%	92
10	Габаритні розміри (висота × діаметр)	м	8,3×4,5
11	Маса газогенератора з футеруванням, не більше	т	21
12	Кількість залишкового продукту (зола, кокс)	кг/ч	30

На нижній кришці встановлена решітка, що обертається. Привід решітки складається з електродвигуна ($N = 3$ кВт, $n = 1500$ об/хв) і двох редукторів, які дозволяють решітці обертатися зі швидкістю 1,5 об/хв.

На нижньому фланці встановлені дві камери з верхньою і нижньою кришками для збору золи. Газогенератор встановлений на трьох стійках. Верхня частина стійки встановлена на конічній цапфі вала, а нижня - на фундаменті.

Система подачі пароповітряної суміші на вал газогенератора складається з повітродувки продуктивністю $G = 0,7$ м³/с і тиском повітря до 4,0 кПа, колектора, що підводить повітря під лопатку і колосникову решітку, і трубопроводу подачі пари до лопатки і решітки. Для регулювання подачі пари і повітря передбачені регулювальні клапани.

Шнековий живильник подає рисове лушпиння до газогенераторної шахти регулярно або безперервно, залежно від режиму роботи. Потім лушпиння переміщується шнеком, який вирівнює "зачисну" поверхню газогенератора і забезпечує рівномірний підйом рисового лушпиння по

висоті валу. Під час руху рисове лушпиння послідовно проходить через зони сушіння, піролізу та газифікації. Шар рисового лушпиння на дні газогенератора нагрівається до 900-1100°C (°C). Для підтримки реакції горіння вдувається повітря, змішане з водяною парою, що підвищує теплотворну здатність виробленого газу за рахунок утворення додаткових водню і чадного газу, а видалення шлаку з колосникової решітки знижує температуру горіння. Газ, що піднімається із зони газифікації, омиває рисове лушпиння і забезпечує його сушіння та піроліз. Потім газ направляється до газопроводу.

Залишковим продуктом процесу газифікації рисового лушпиння є зола, що містить незгорілий вуглець. Ця зола видалається при обертанні колосникової решітки з відкритою засувкою через два отвори в нижній частині газогенератора. Зола накопичується у двох накопичувальних бункерах, де вона охолоджується до температури близько 70 °C і виводиться при відкритій нижній засувці.

У ручному режимі газогенератор запускається (за допомогою факела через жарову трубу), газогенератор працює протягом однієї "свічки" і зупиняється для планового відключення. Автоматичний контроль роботи газогенератора забезпечується температурою виробленого газу, яка підтримується в діапазоні від 200 °C до 300 °C. Температура газу регулюється шляхом зміни рівня палива в газогенераторі. Якщо температура газу нижче 200 °C, шнековий живильник вимикається і не заправляється. Якщо температура газу перевищує 300 °C, шнековий живильник відкривається, рівень палива в газогенераторі збільшується, а температура газу знижується. Якщо температура газу перевищує контрольну межу, відбувається автоматичне аварійне припинення подачі газу в газопровід і відкривається клапан на виході газу з генератора до свічки запалювання.

2.2 Система газифікації нижнього ходу Imbert [6]

2.2.1 Принцип

Газифікатор нижнього ходу Imbert або газифікатор з горловиною нижнього ходу має супутний потік газів і твердих речовин через наповнений шар нижнього ходу, який підтримується через звуження або горловину. Паливо з біомаси надходить через бункер і стікає вниз, висушується та піддається піролізу перед частковим спалюванням газифікаційним середовищем (повітрям), що надходить через форсунки. Горловина дозволяє максимально змішувати гази в області високої температури, що сприяє крекінгу гудрону. Нижче звуження або «горловини» гази згорання разом із смолою проходять через гаряче вугілля та відновлюються переважно до CO та H₂. Газифікатор може обробляти однорідне за розміром паливо з біомаси з вмістом вологи та зольності менше 20 % і 5 %, відповідно. Газогенератор нижнього ходу з горловиною (Імберта) зазвичай використовується для газифікації деревної біомаси однакових розмірів і форм (блоків), оскільки вони плавно протікають через звужене вогнище. Газ, що видобувається з газифікатора нижнього ходу, містить менше смол (<1 %), вищу температуру (близько 700 °C) і більше твердих часток, ніж газогенератор верхнього ходу. Газогенератор має нижчу загальну ефективність, оскільки велика кількість тепла переноситься гарячим газом (Clarke, 1981; Reed and Das, 1988). Фізичні обмеження розміру частинок біомаси обмежують потужність газифікаторів з горловиною низхідного потоку до 500 кВт.

2.2.2 Модифікації системи газифікатора нижнього ходу

Горловина газогенератора нижнього ходу становить небезпеку для палива з біомаси низької густини. Біомаса у формі гілочок, паличок або брусків не стікає плавно, викликаючи утворення мостів і каналів, що призводить до збільшення виробництва смол. Робота газогенератора з

горловиною нижнього ходу дуже чутлива до розміру та якості вихідної сировини. У газифікатор були внесені модифікації для успішної газифікації палива низької та середньої густини, наприклад стебла, оболонки тощо.

Liinanki et al. (1985) представили обертову решітку та подвійний конічний бункер у газифікаторі з низхідним потоком для газифікації пилу кокосового волокна, стебла бавовни та пшеничної соломи. Паливо мало меншу густину і вищу зольність порівняно з дровами та було ущільнено в брикети. Подвійний конічний бункер у газифікаторі (рис. 2.6) створював простір для розширення паливних брикетів під час їх нагрівання, щоб уникнути проблеми утворення мостів у зоні піролізу. Обертova решітка видаляла частинки шлаку перед їх агломерацією в газифікаторі. Відстань між дросельною плитою та решіткою також було збільшено, щоб збільшити об'єм зони відновлення для кращого розподілу шлаку в шарі коксу. Система газифікації складалася з газифікатора з циклоном для видалення грубого пилу та склотканини для видалення дрібного матеріалу. ККД холодного газу становив 72-77 %. Вміст смоли був нижче 1 г/нм³. Пелети з пшеничної соломи також були протестовані, але через малий розмір частинок потоки холодного газу проходили між горловиною і повітряними соплами, що призводило до неповного крекінгу смоли та утворення газу з високим вмістом смоли.

Jaуаh та ін. (2003) досліджували газифікацію стружки каучукової деревини різного вмісту води (12,5-18,5 %) і розміру стружки (3,3-5,5 см) у газифікаторі з низхідним потоком потужністю 80 кВт, який мав подвійну стінку з повітрям. проміжок між ними. Під час роботи газифікатор струшували, щоб уникнути замикання палива в горлі. Маленькі чіпси піддавалися швидшому перетворенню коксу, що підвищувало ефективність перетворення і, отже, вимагало меншої довжини зони газифікації. Більший кут горловины знижує температуру,

швидкість реакції та ефективність перетворення, тоді як менші кути вимагають більшої довжини зони газифікації для досягнення оптимальної ефективності. Для деревної тріски з вологістю 15 % оптимальний розмір тріски був 5 см, довжина зони газифікації 22–33 см, кут горловини 61° та ефективність перетворення 56 %. Вміст смоли, водяної пари та золи становив 7-9 % від виходу виробничого газу.

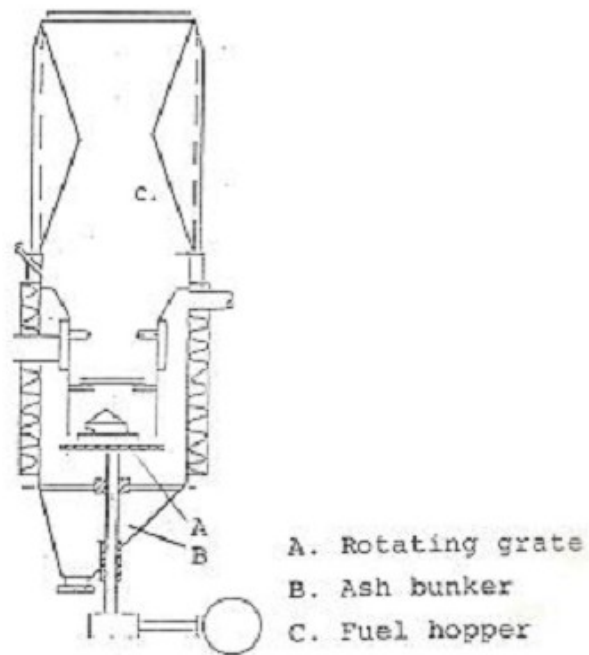


Рис. 2.6. Газифікатор із низхідним потоком, модифікований для недеревної біомаси

Sasidharan et al.. (1995) повідомили, що газифікатори нижнього ходу, облицьовані керамічним матеріалом, мали більший термін служби та меншу вартість, ніж газифікатори нижнього ходу, виготовлені з аустенітної сталі для системи газифікатора біомаси потужністю менше 500 кВт. Газогенератор, виготовлений зі сталі, вийшов з ладу в області горловини та повітряного сопла через високотемпературне окислення та корозію переважно протягом 1500 годин роботи, тоді як газифікатор, облицьований керамічним матеріалом, міг витримати термічний удар. До складу керамічного матеріалу входили глинозем (50-70 %), каолін (16-20 %), польовий шпат (10-15 %) і тальк (3-7 %).

Warren et al. (1995) зменшили відстань між решітками та збільшили

висоту ґрат, щоб вона не забивалася коксом у газифікаторі з низхідним потоком, який використовується для газифікації деревної тріски порослевої верби та тополі. Дрібні частинки деревної стружки блокували потік повітря, знижуючи температуру в деяких ділянках горловини. Паливний агітатор використовувався для перемішування деревної тріски, щоб забезпечити вільний потік палива, але він був неефективним. Перекриття дрібних частинок палива не було успішно вирішено, тому паливо довелося видалити ці частинки перед газифікацією.

2.2.3 Газифікація недеревної біомаси в газифікаторі нижнього ходу з горловиною

Dogru et al. (2004) і Midilli et al. (2004) також використовували газифікатор нижнього ходу для газифікації залишків брикетованої пилової шкіри (BDLW) із вмістом вологи 11,23% (сух. стан). При збільшенні витрати BDLW з 2,09–5,04 кг/год отримано 0,08–0,21 кг/год золи, 0,04–0,06 кг/год гудрону та 0,60–1,39 кг/год конденсату. Витрата вологого газу зросла майже лінійно з 3,78 нм³/год до 9,72 нм³/год при збільшенні витрати палива. Горючі гази становили від 29 до 33% від загального утвореного вологого газу. Найпродуктивніша зона газифікації залишків шкіри була між 486,39 і 584,36 нм³м⁻²год⁻¹ питомої швидкості газифікації (SGR). Оптимальна ефективність холодного газу становила 46,50%, близько 486,39 нм³м⁻²год⁻¹ SGR. Великі брикети залишків шкірки час від часу утворювали містки в області горловини газифікатора.

Midilli et al. (2001) газифікували осад стічних вод у газифікаторі нижнього ходу потужністю 10 кВт, і утворений газ містив 19-23% горючих газів і LHV 2,55-3,2 МДж/нм³. Dogru et al. (2002) досліджували газифікацію шкаралупи фундука з вмістом вологи 12% (сух. стан) у газифікаторі нижнього ходу потужністю 5 кВт. Оптимальна продуктивність газифікатора коливалась від 1,44 до 1,47 нм³/кг відношення повітря-паливо та 4,06 і 4,48 кг/год вологої подачі. Висока

якість виробного газу HHV (4,75-5,15 МДж/м³) була зумовлена високою температурою горловини (1015-1206 °С) і низьким вмістом коксу (0,201-0,228 кг/год) і смол (0,023-0,025 кг/год). При оптимальній температурі горловини 1000-1050 °С не спостерігалось жодних ознак утворення мостів або плавлення золи, оскільки зольність шкаралупи фундука була досить низькою, тобто 0,77%. При вищих витратах повітря (>1,5 Нм³/кг) HHV газоподібного продукту мало значне зниження, тоді як вихід смол збільшився, оскільки більша витрата повітря призвело до більшого горіння. Виробничий газ очищали й охолоджували, пропускаючи через скруббер із наповненим шаром і деревний або вугільний сухий фільтр.

2.2.4 Застосування газифікатора нижнього ходу з соплом

Виробничий газ із газогенератора нижнього ходу використовується для термічного застосування, наприклад для сушіння зерна або як паливо для котлів. Kutz, et al., (1983) використовували газифікатор нижнього ходу (830 МДж/год) у поєднанні з камерою згорання для сушіння зерна. Горловина газифікатора складалася з V-подібних каналів, обрамлених трикутними каналами, які були розділені для відділення первинного повітря від вторинного. Газогенератор був ізольований вогнетривкою цеглою, обшитою оболонкою з м'якої сталі. Повітря попередньо нагрівалося, коли воно проходило через повітроводи. Качани кукурудзи вологістю 8,1, 23,2 і 32 % газифікували повітрям. У міру збільшення швидкості потоку первинного повітря швидкість газифікації зростала лінійно, тоді як із збільшенням вмісту води в біомасі швидкість газифікації зменшувалася. Коефіцієнт зменшення також зменшувався зі збільшенням вологості біомаси і становив 3:1 при вологості 8,1%. Відношення викидів твердих частинок до споживання енергії становило 134 мг/МДж, що було вище стандарту ЕРА для вугільних котлів великої потужності.

Відомо, що газифікатор низхідного потоку з горловиною генерує

найкращу якість виробничого газу з мінімальним вмістом смол для двигунів (Jain (2006). Sheng (1989) повідомив, що газифікатори нижнього ходу з горловиною були комерційно доступні в Китаї (рис. 2.7). Вони могли працювати на різних видах палива (дерево, кукурудзяні качани, шкаралупа твердих горіхів, тирса та кам'яне вугілля), а вихідний газ мав 20–28 % CO та понад 12 % H₂ і був придатним для приводу дизельних двигунів.

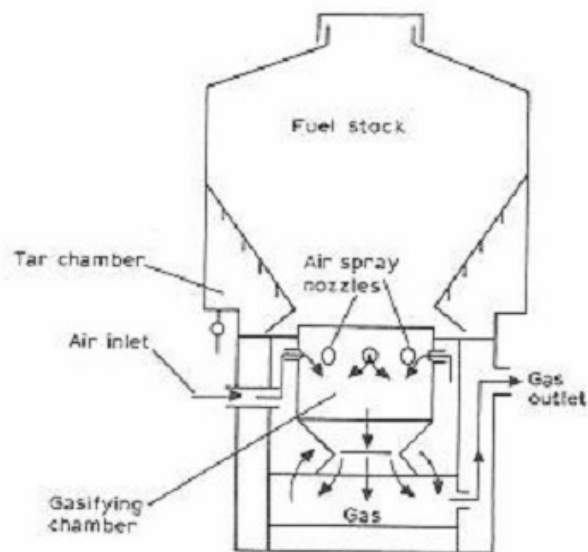


Рис. 2.7. Багатопаливний газифікатор з низхідним потоком

Warren, et al., (1995) використовували газогенератор нижнього ходу з горловиною для газифікації деревної тріски порослевої верби та тополі. Виробничий газ пропускався через подвійний циклон, трубний і реберний охолоджувач, а також тирсу та пінопластовий фільтр для видалення твердих частинок і смоли. Його змішували з повітрям у трубці Вентурі перед використанням у двигуні для вироблення 30 кВт електроенергії (рис. 2.8).

Газогенератор нижнього ходу з горловиною потужністю 10 кВт був протестований для різних палив з біомаси після їх попередньої обробки (зменшення розміру та/або брикетування). Виробничий газ використовувався як додаткове паливо в насосному агрегаті дизеля. Газ, отриманий від газифікації акації золотистої, деревної тріски, паливної

деревини та стебел сорго, замінив дизель у двигунах із запалюванням від стиснення (ЗС) на 70-76 %, 62,25 %, 22,5 % та 58,60 % відповідно. В іншому випробуванні газифікатора з горловиною низького потоку потужністю 3,75 кВт тамариндус і качани кукурудзи були газифіковані, а виробничий газ замінив 62,27 % і 48-52 % дизеля відповідно (Jain, 1996).

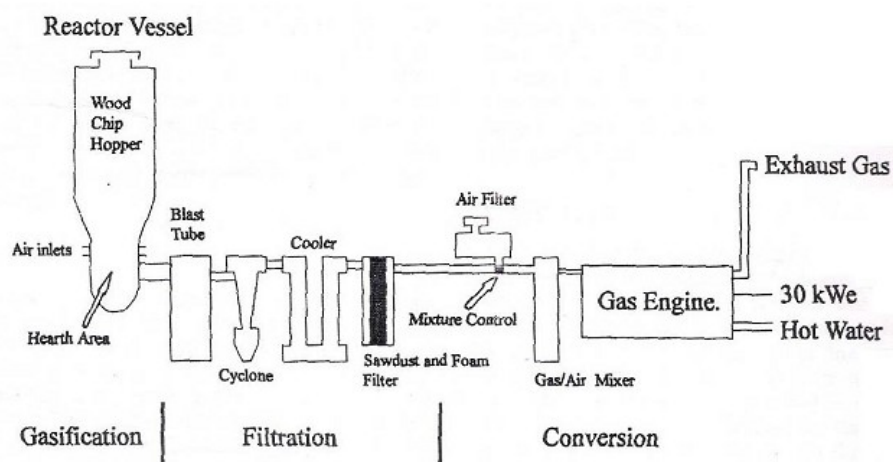


Рис. 2.8. Система газифікації з низхідним потоком для застосування двигуна

Ghosh та ін. (2004) повідомили про використання газифікаторів нижнього ходу 5×100 кВт для електрифікації 5 сіл на островах Госаба (Gosaba) в Західній Бенгалії, Індія. Кожен газифікатор нижнього ходу потужністю 100 кВт був оснащений системою охолодження газу з розпиленням води, двоступеневою системою очищення газу, повітродувкою, двигуном (165 к.с.), з'єднаним з генератором змінного струму 125 кВА, і насосними установками для циркуляції води в газоохолоджувальній вежі та для видалення золи з реактора. Середня витрата дров та дизельного палива на кВт/год виробленої електроенергії становила 0,822 кг та 0,135 л. Заміщення дизеля промисловим газом становило 59 %. Загальний ККД заводу Gosaba був 19 %. Leung та ін. (2004) повідомили про використання газифікаторів нижнього ходу з ефективністю 75 % у Китаї для газифікації соломи для домашнього приготування їжі. Потужність газифікаторів становила 60-200 кВт, а теплота згоряння генераторного газу становила 3,8-4,6 МДж/м³.

2.3. Порівняльна характеристика шарових газогенераторів і газогенераторів в киплячому шарі

У таблиці 2.4 порівнюються балонні газогенератори з газогенераторами псевдозрідженого шару на основі досвіду експлуатації подібних установок у різних частинах світу та використовуваної технології.

Таблиця 2.4

Порівняння шарового газогенератора та газогенератора киплячого шару

Шаровий газогенератор	Газогенератор киплячого шару
1. Технологія	
(-) Нерівномірний розподіл температури палива в шарі;	+Температура палива рівномірно розподілена по всьому об'єму газогенератора;
(-) Виражені зони ендотермічних реакцій;	+Тепловиділення розподіляється по всьому об'єму реактора;
(-) Ускладнений теплообмін;	+Хороша тепловіддача;
(-) Потенційна можливість плавлення золи	+Хороший контакт між паливом і окислювачем завдяки перемішуванню.
(-) Час перебування палива в реакторі: від годин до днів;	+Час перебування палива в реакторі: від секунд до хвилин;
2. Досвід експлуатації	
+Простота, надійність, можливість використання різних видів палива;	+ Газові генератори можуть використовуватися в широкому діапазоні потужностей;
+ Однаковий тип процесу, що використовується для установок різної потужності;	+ Надійність і безпека забезпечуються при використанні більшості видів палива;

Шаровий газогенератор	Газогенератор киплячого шару
3. Газогенератор	
<ul style="list-style-type: none"> - Низька потужність обладнання; - Більший час перебування палива в реакторі; + Діапазон регулювання потужності 20-110%; + Можливість роботи на низьких навантаженнях; - Низький діапазон регулювання потужності; - Тривалий час попереднього розігріву; 	<ul style="list-style-type: none"> + Велика потужність установки; + Короткий час перебування палива в газогенераторі; + Діапазон регулювання потужності 50-120%; - Зниження потужності, обмежене швидкістю частинок палива; + Легкий запуск і зупинка; +Короткий час прогріву;
4. Якість одержуваного газу	
<ul style="list-style-type: none"> (-) газ може містити смоли, феноли та кислоти; (+) газ може бути використаний для прямого спалювання; (-) низька температура газу; + Низьке винесення золи; +Низька концентрація пилу в газі; 	<ul style="list-style-type: none"> (-) газ може містити смоли, феноли та кислоти; (+) газ може бути використаний для прямого спалювання; (-) температура газу схожа на температуру в об'ємі реактора; - Високе винесення золи; - Висока концентрація пилу;
5. Ефективність конверсії вуглецю	
<ul style="list-style-type: none"> (+) конверсія вуглецю велика; (+) потрібна менша кількість окислювача; 	<ul style="list-style-type: none"> (+) конверсія вуглецю велика;
6. Необхідна швидкість дуття	
<ul style="list-style-type: none"> (+) не потрібна висока швидкість дуття; 	<ul style="list-style-type: none"> (-) необхідна висока швидкість дуття для забезпечення киплячого шару;
7. Інвестиції	
<ul style="list-style-type: none"> -Інвестиції є важливими, і чим вища потужність, тим більші інвестиції. 	<ul style="list-style-type: none"> (+) інвестиції не великі

2.4. Система охолодження і очистки газу [3]

На виході з газогенератора газ гарячий і забруднений шкідливими домішками, такими як зола, шлак, вугільний пил, сажа, смола, сульфідні сполуки і волога.

Гарячі гази, як правило, непридатні для роботи двигуна, оскільки їх низька щільність призводить до низької теплоємності, що значно знижує вихідну потужність двигуна.

Механічні домішки і смоли в газах оточують впускну систему і циліндри двигуна, перешкоджаючи нормальній роботі двигуна і поступово забруднюючи мастило, викликаючи передчасний знос тертьових деталей. Тому перед впуском в двигун гази необхідно охолодити і видалити механічні домішки.

Охолодження газу

У газогенераторах поперечної або прямої газифікації, призначених для роботи на деревній масі або антрацитовому вугіллі, газ, що виходить з генератора під час стаціонарної роботи, має температуру близько 450-600°C, але коли транспортний засіб рухається, температура газу на виході знижується до 25-300°C в результаті обдування газогенератора потоком

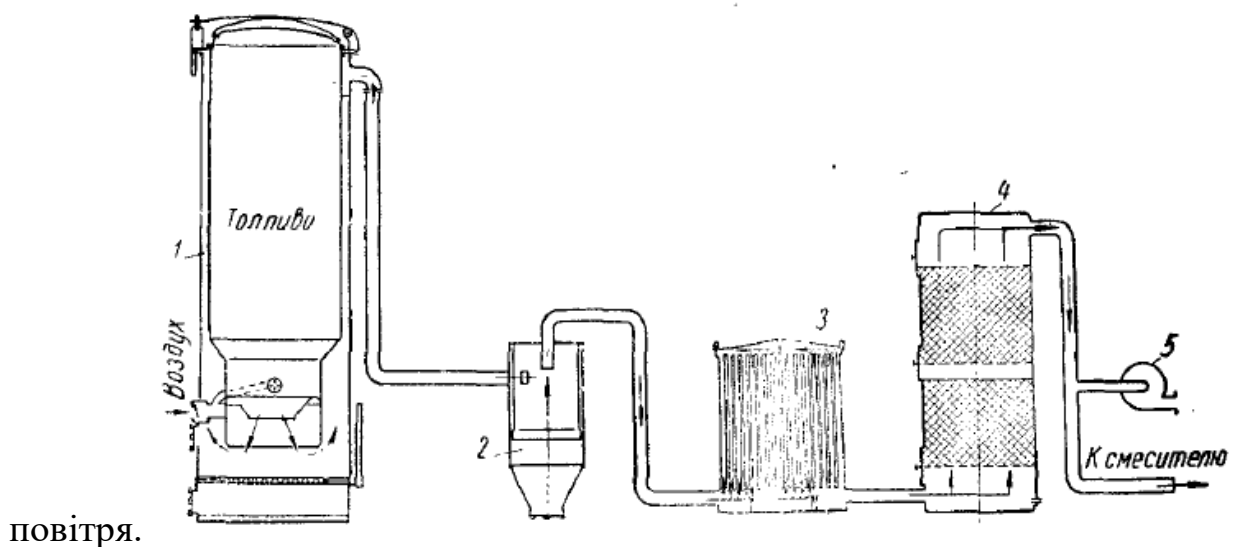
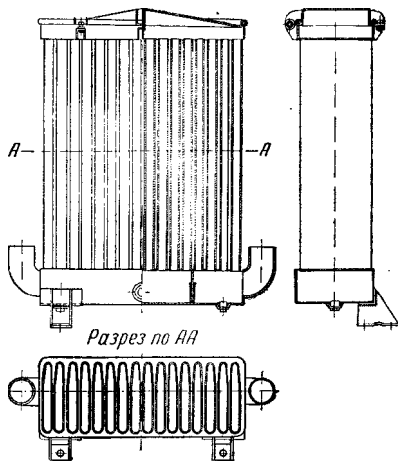


Рис.2.9. Принципова схема газогенераторної установки:

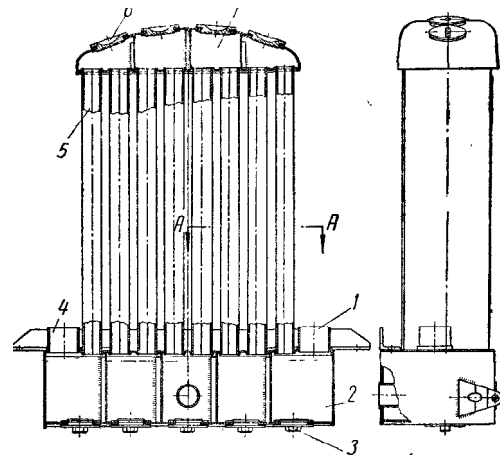
1 – газогенератор; 2 - очисник газу; 3 - охолоджувач газу; 4 - фільтр тонкого очищення газу; 5 – вентилятор розпалювання

У газогенераторах зворотної газифікації деревної тріски з повним обігрівом камери і верхнім відбором газу газ в газогенераторі охолоджується більш інтенсивно, і температура на виході зазвичай не перевищує 120-180°. Однак, ця температура все ще занадто висока.

Для того, щоб максимізувати щільність заряду газоповітряної суміші, газ повинен бути охолоджений до температури навколишнього середовища. Однак на практиці, коли температура навколишнього середовища становить 15°C, газ можна охолодити лише до +30°C - +40°C. Для подальшого охолодження газу необхідно значно збільшити поверхню охолодження, що поки що не є практичним для транспортних газогенераторів, які обмежені своїми невеликими розмірами і малою вагою.



**Рис.2.10. Охолоджувач газу
радіаторного типу газогенераторної
установки
НАМИГ-78**



**Рис.2.11. Охолоджувач газу
радіаторного типу газогенераторної
установки
УралЗИС-2Г**

Охолоджуючі гази проходять або через довгий трубопровід, що з'єднує газогенератор зі скруббером, або через спеціальний охолоджувач радіаторного типу, встановлений перед водяним радіатором автомобіля, як в газогенераторній установці УралЗИС-2Г (рис. 2.9).

Конструкція радіаторного охолоджувача показана на рисунках 2.10 і 2.11. 2.10 та 2.11.

Восьмиходовий охолоджувач газогенераторної установки НАМИГ-78 (рис. 2.10) складається з нижнього і верхнього баків і восьми труб еліптичного перерізу. Газ надходить у лівий відсік нижнього резервуара через патрубок 1, проходить послідовно через вісім вертикальних труб 5 і повертається на 180° у нижньому резервуарі 2 і верхньому резервуарі 7. Охолоджений газ виводиться через патрубок 4. У верхньому резервуарі є чотири пробки 6, а в нижньому

резервуарі - п'ять пробок 3 для перевірки і очищення охолоджуючої рідини. На зовнішній стороні нижнього бака є невеликі отвори для зливу конденсату.

Велика кількість пробок в радіаторі створює зайві незручності в експлуатації через збільшення часу, необхідного для очищення радіатора.

У цьому відношенні більш зручним є 4-ходовий радіаторний охолоджувач УралЗИС-2Г (рис. 2.11). Цей радіатор має 16 трубок, розташованих вертикально. Кришка верхнього бачка відкривається, закриваючи весь ряд трубок, що дозволяє легко оглядати і промивати радіатор. Нижній резервуар має пробки, одну спереду і дві знизу, для зливу води під час промивання охолоджувача. Конденсат, що утворюється в охолоджувачі, зливається через отвори в пробках. Два кронштейни, приварені до переднього нижнього бачка, служать для з'єднання охолоджувача з поперечною шасі автомобіля.

Охолодження газу зазвичай здійснюється в одній установці одночасно з очищенням від механічних домішок. Кожен очищувач певною мірою охолоджує газ, а кожен охолоджувач хоча б до певної міри є очищувачем. Тому, як правило, агрегати, що входять до складу системи очищення та охолодження газу, є комбінованими. Однак, залежно від їхньої основної функції, їх називають очисниками або охолоджувачами. Газ охолоджується в очиснику в результаті його розширення і теплопередачі до стінок. Конденсована водяна пара допомагає очистити газ від дрібних частинок попелу і вугільного пилу.

Разом з конденсацією водяної пари частково конденсується і залишкова смола, що міститься в газі. Однак газ необхідно очищати від смоли в самому генераторі, використовуючи обраний процес смолоутворення і правильно підбираючи параметри і конфігурацію камери газифікації. Газ, що виходить з генератора, не повинен містити більше 0,5 г смоли на м³ сухого газу.

Механічні домішки в газі

У сучасних транспортних газогенераторних установках з газогенератора транспортується в середньому 2-3,5 г пилу на кубічний метр газу. Залежно від навантаження вміст пилу в газі значно змінюється.

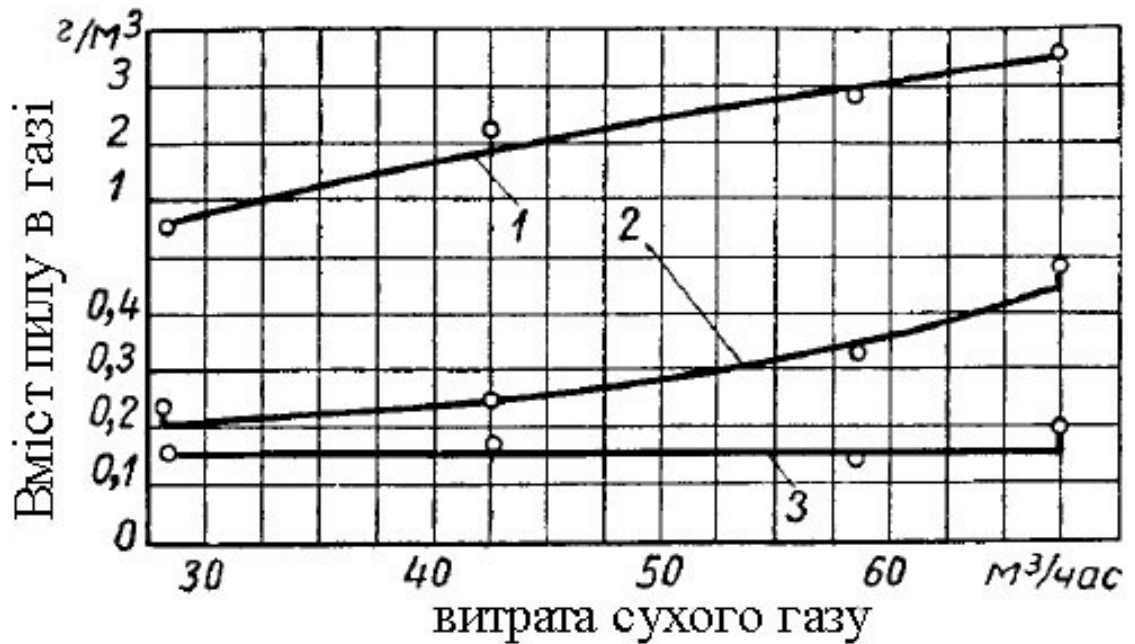
На рис. 2.12 показано зміну вмісту пилу в газі при різних положеннях розвантажувального пристрою ГАЗ-42, що працює на дерев'яних клинах.

Наприклад, при роботі з м'якою тріскою або деревним вугіллям з високим вмістом дрібнодисперсного пилу вміст пилу може становити до 7-8 г на м³ газу.

У деяких випадках, наприклад, при роботі з тріскою м'яких порід або значною кількістю дрібнозернистого вугілля, вміст пилу може збільшуватися до 7-8 г на м³ газу.

У стаціонарних установках максимальне забруднення газів, що надходять у двигун, зазвичай не перевищує 0,02-0,03 г на м³ газу. У транспортних газогенераторах автомобільного типу обмеженого розміру кількість пилу, що потрапляє в двигун, може досягати 0,15 г на м³ газу. У цьому випадку двигун може швидше зношуватися при роботі на газі, ніж при роботі на бензині.

Пил генераторного газу - це суміш дрібних частинок вугілля, сажі, золи або дисперсного шлаку. За розміром частинок пил поділяється на грубий і дрібний. Грубий пил з розміром частинок більше 60 мікрон опускається зі зростаючою швидкістю в спокійному повітрі; дрібний пил з розміром частинок менше 60 мікрон опускається з постійною швидкістю в спокійному повітрі; частинки менше 20 мікрон залишаються в підвішеному стані; і дрібний пил з розміром частинок менше 20 мікрон опускається з постійною швидкістю в спокійному повітрі.



**Рис.2.12. Вміст пилу в газі в різних місцях газогенераторної установки ГАЗ-42 в залежності від продуктивності газогенератора з дослідів інж. Коренєва в НАТІ:
1 - після газогенератора; 2 - після грубого очисника;
3 - за фільтрами.**

Приблизний склад пилу з газогенераторів зворотного процесу, що працюють на деревній трісці, та перехресних газифікаторів, що працюють на антрациті, показано в Таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Вид пилу	Розмір частинки в мм	Кількість пилу в % по вазі	
		дерев'яно тріскової	антрацитової
Груба	Більше 425	16	18
	425—250	10	
	250—60	16	
Тонка	60—46	58	60
	Меньше 46		22

З табл. 2.5 видно, що більшу частину пилу, що міститься в газі з деревних чурок, становить тонкий пил.

Таблиця 2.6

Паливо	Процес газифікації	Зольність пилу в %	
		за газогенератором	перед змішувачем
Дерев'яна тріска	обернений Поперечний	45	50
		40	70

Зольність пилу, що залишається в газі перед змішувачем, вища, ніж зольність пилу в газі на виході з газогенератора, особливо при роботі з антрацитовим вугіллям. Це пов'язано з тим, що грубий пил містить більше незгорілих частинок палива, ніж дрібний пил, який в основному складається з золи і дисперсних частинок шлаку.

Частина пилу (20-30%) є розчинною у воді. Ця властивість пилу може бути використана для підвищення ефективності газоочистки шляхом промивання водою.

Через різну природу грубого і дрібного пилу в газовому потоці для його уловлювання використовуються різні типи очищувачів.

Грубе очищення газу

Інерційні очисники використовуються для очищення газу від великих частинок пилу, оскільки вони мають властивості інерційних звичайних твердих тіл.

Найпростіший інерційний вихровий очищувач, який називається циклоном, показаний на рисунку 2.13. Газ надходить у циклон через сопло 1, розташоване відносно корпусу циклону. В результаті газ набуває обертового руху і найважчі частинки пилу в ньому відкидаються відцентровою силою до стінок корпусу 3. Частинки пилу, що труться об стінки корпусу, втрачають швидкість і під дією сили тяжіння потрапляють в пиловловлювач 6. Відбивачі 4 перешкоджають поверненню пилу в газ. Очищений газ виводиться з циклону через газовідвід 2. Пил, що осідає в циклоні, виводиться через кришку 5.

Для зменшення теплових втрат стінки циклону в зоні робочої камери мають подвійні стінки. Це запобігає конденсації водяної пари, що міститься в

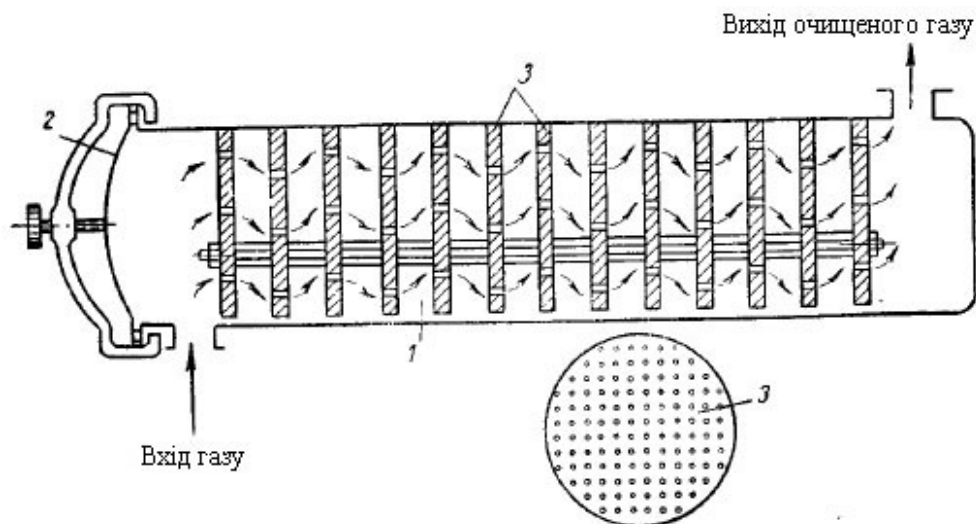
газі, на внутрішній поверхні камери циклону і налипанню на неї вугільного пилу, що перешкоджає нормальній роботі циклону. З цієї причини циклони зазвичай встановлюються в газопроводі відразу після газогенератора.

Інша конструкція циклону з вищим ступенем очищення показана на рис. 2.13. Циклон складається зі зварного циліндричного корпусу 1 з робочою камерою 2 всередині. Верхня частина робочої камери виконана у вигляді спіралі навколо вихідного патрубку 3, який утворює з горизонталлю кут 15° .

Безпосередньо до спіралі робочої камери приварений тангенціальний вхідний патрубок 4 під кутом 15° до горизонталі. До основи робочої камери приварений конус 5, який спрямовує частинки, що випадають з робочої камери, до пиловловлювача 6, де запобігає поверненню накопиченого пилу в єдиний потік. Кришка 7 з різьбовою кришкою розташована в нижній частині корпусу циклону і служить для очищення нижнього пилозбірника для запобігання його виносу.

Циклон має відносно невеликі габарити і забезпечує дуже високий ступінь очищення газу (до 90-95%), але зі зменшенням швидкості, тобто об'єму всмоктуваного газу, якість очищення в циклоні знижується.

У багатьох автомобільних установках часто використовуються комбіновані інерційні системи очищення та охолодження газів.



Фиг. 2.13. Схема дії грубого очищувача-охолоджувача з перфорованими пластинами

Їх називають очисниками для охолодження шорстких поверхонь. У цих очисниках великі і середні частинки пилу відокремлюються за рахунок зміни напрямку і швидкості потоку газу, що проходить через перфоровані пластини. При цьому газ охолоджується за рахунок тепловіддачі від стінок очищувача до навколишнього середовища.

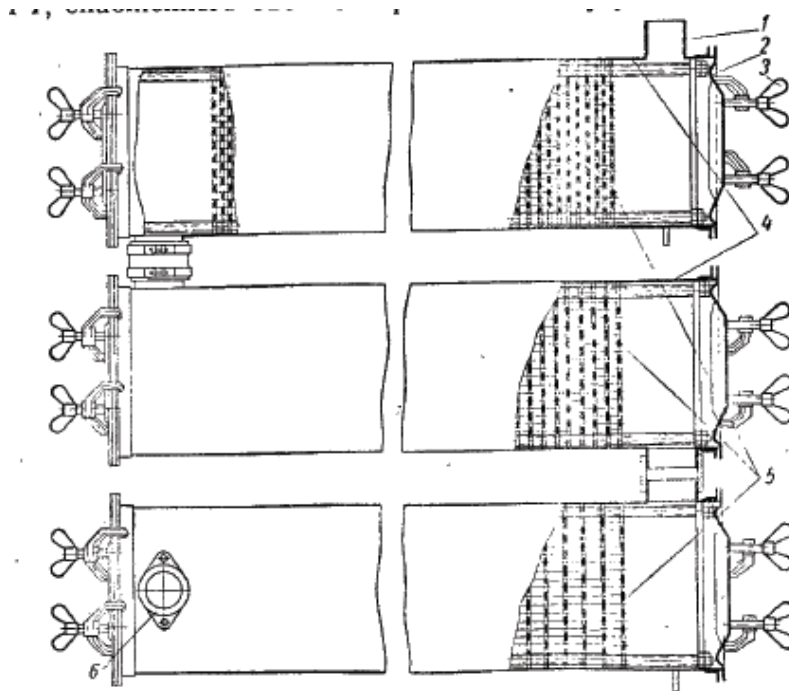


Рис. 2.14. Батарея грубих очищувачів-охолоджувачів з перфорованими пластинами: 1 – вихідний патрубок; 2-кришка очищувача, 3-затяжний гвинт кришки, 4 - корпус очищувача, 5 – перфЗоровані пластини, 6 - вхідний патрубок

Такий очищувач (рис. 2.14) складається з металевому корпусу 1 зі знімною кришкою 2. Всередині корпусу знаходиться насадка, що складається з ряду пластин 3 з безліччю дрібних отворів, розташованих в шаховому порядку. Газ, проходячи через отвори в пластинах, постійно змінює свою швидкість і напрямок руху, а частинки пилу, вдаряючись об стінки пластин, осідають або падають.

На рисунку 2.14 показана груба батарея очищувача-охолоджувача, що складається з трьох послідовно з'єднаних прямокутних секцій. Кожна наступна секція має тарілку з великою кількістю дрібних отворів, завдяки чому підвищується чистота газу.

Подібні скрубери використовуються в системах зонної нейтралізації автомобілів ГАЗ-42 і ЗІС-21А.

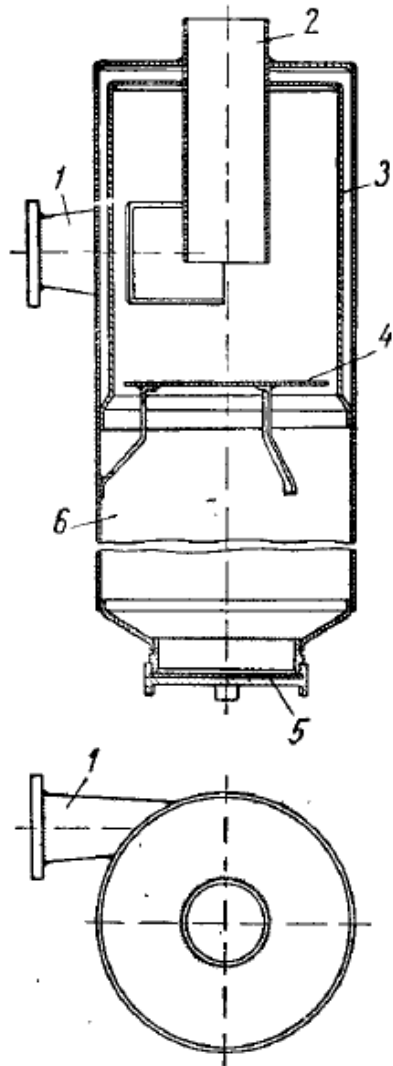


Рис.2.15 Очищувач типу циклон газогенераторної установки НАТИ-Г-78

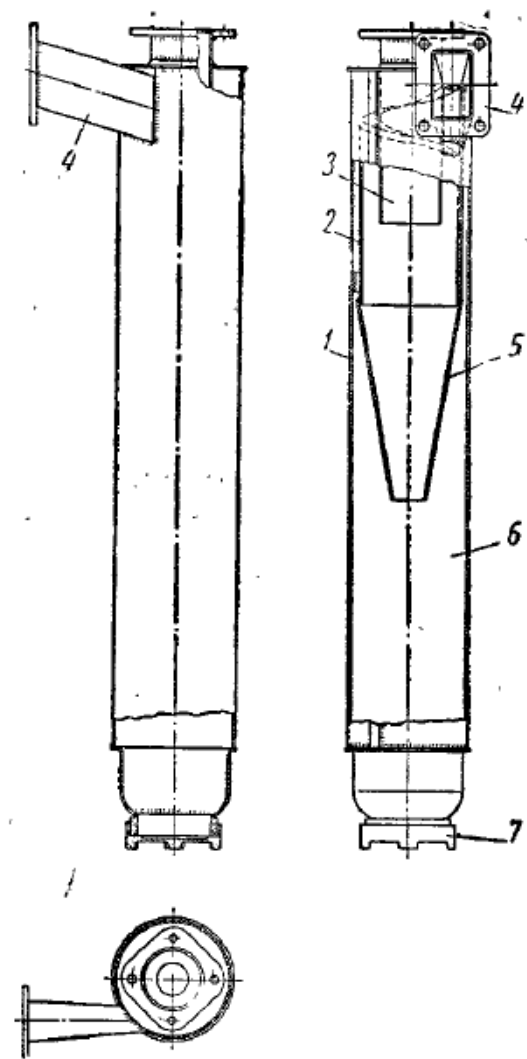


Рис.2.16 Очищувач типу циклон газогенераторної установки УралЗИС-352

3. Розрахунок газогенератор нижнього ходу на пелетах соняшнику

3.1. Розрахунок безперезимного газифікатора нижнього ходу

Схема газифікатора

Газифікатор нижнього ходу – це реактор супутних потоків, де повітря потрапляє в газифікатор на певній висоті нижче верхівки. Вироблений газ прямує вниз (тому – нижнього ходу) і виходить через шар гарячої золи (рис. 3.1). Оскільки газ проходить через зону високої температури гарячої золи, то смола в газі-продукті знаходить сприятливі умови для крекінгу. З цієї причини газифікатор оберненого процесу в усіх типів газифікаторів щільного шару имає найнижчий ступінь генерації смоли

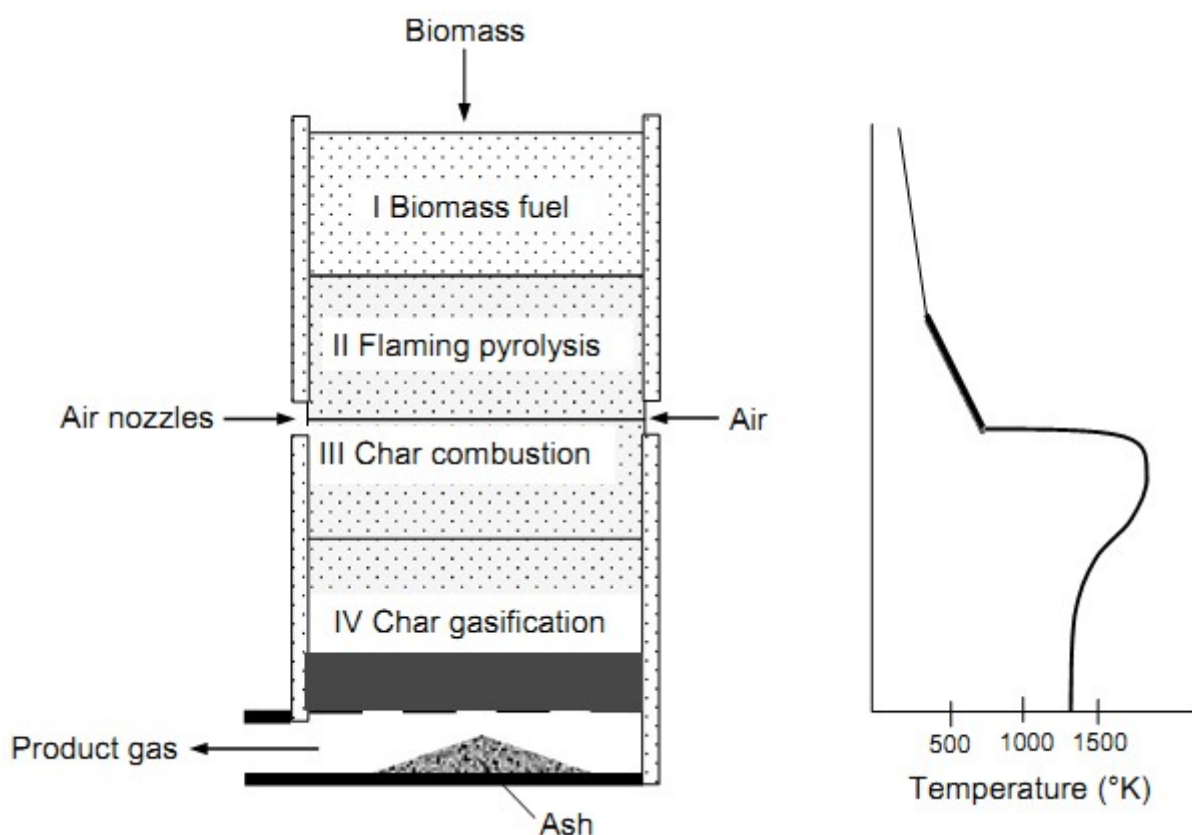


Рис. 3.1. Схема роботи безперезимного газифікатора нижнього ходу. Хід температури вздовж висоти, показано праворуч.

Цей тип газифікатора також називають з відкритим верхом, або стратифікованим безперезимним. Тут верх знаходиться при атмосфері, і в судині газифікатора немає пережиму, оскільки стінки вертикальні. На рисунку 1 видно, що конструкція без пережиму дозволяє безперешкодно переміщувати біомасу вниз по газифікатору. Відкрите ядро – це ще одна безперезимна конструкція, але тут повітря не подається з середини, як в інших типах

газифікаторів нржнього ходу. Повітря втягується в газифікатор зверху відсмоктуванням, створеним внизу потоку газифікатора. Такі газифікатори підходять для більш дрібного палива, наприклад, більш легкої біомаси як рисове лушпиння.

Процес газифікації в такому газогенераторі можна умовно розділити на 4 зони. Зона I, або найвища зона, отримує сире паливо зверху, яке висушується в повітрі, що проходить через неї та за рахунок теплопровідності від зони II. Зона II отримує тепло від зони III в основному за рахунок теплопровідності.

Під час свого руху через зону I біомаса нагрівається (рис. 1). При температурі вище 350 °C вона піддається піролізу, розпадаючись на кокс, неконденсовані гази (CO, H₂, CH₄, CO₂ та H₂O) та пари смоли (конденсовані гази). Продукт піролізу в зоні II отримує лише обмежене надходження повітря і горить в полум'ї, збагаченому паливом. Це називається **палаючим піролізом**. Більшість смол та коксу утворюються в зоні III, де вони виробляють тепло для піролізу та подальшої ендотермічної реакції газифікації. Зона III містить золу та піролітичний кокс, які утворюються в зоні II. Під час переходу через кокс гарячі гази, що містять CO₂ і H₂O, піддають частинки коксу реакції газифікації парою (C + H₂O = CO + H₂) та реакції Будуара (C + CO₂ = 2CO), утворюючи CO та H₂. Температура газу, що виходить, помітно знижується завдяки ендотермічним реакціям газифікації, але все ще вище 700 °C.

Найнижчий шар (зона IV) складається з гарячого золи та/або непрореагованого коксу, які розкладають всю неперетворену смолу в цьому шарі. На рисунку 1 показані реакції та розподіл температури по висоті газифікатора. В одній з версій безперешкодного газифікатора (з відкритим ядром) повітря надходить зверху разом з подачею.

Розрахунок витратних характеристик генераторного газу

Відомий елементний склад палива (біомаси) для газифікації – волога деревина:

$$C^r = 36.81\%;$$

$$H^r = 3.55 \%;$$

$$O^r = 27.79 \%;$$

$$N^r = 0.35\%;$$

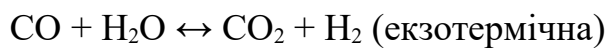
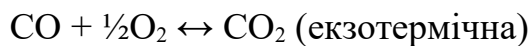
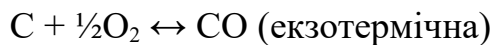
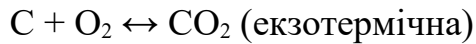
$$A^r = 1.50\%;$$

$$W^r = 30.00\%;$$

Нижча теплота згоряння біомаси $LHV = 12.39$ МДж/кг

Втрат вуглецю палива з недопалом $C^{los} = 0.5\%$.

Хімічні реакції з вуглецем та оксидом вуглецю



Відомий очікуваний склад синтез-газу (сухого):

$$CO = 19.0\%$$

$$H_2 = 18.1\%$$

$$CH_4 = 0.4\%$$

$$CO_2 = 13.0\%$$

$$N_2 = 49.5\%$$

$$O_2 = 0.00\%$$

На основі рівняння матеріального балансу вуглецю, що перетворився в газ:

$$(C^r - C^{los}) = V_{dsg} \times (CO + CO_2 + CH_4) \times \frac{\mu_C}{22.4}$$

розраховується питомий вихід сухого синтез-газу V_{dsg} , нм³/кг палива

$$V_{dsg} = \frac{C^r - C^{los}}{(CO + CO_2 + CH_4) \times \frac{\mu_C}{22.4}}$$

$$V_{dsg} = \frac{36.81 - 0.5}{(19.0 + 13 + 0.4) \times \frac{12}{22.4}} = 2.092$$

Густина сухого синтез-газу становитиме, кг/нм³:

$$\rho_{dsg} = \frac{\mu_{CO} \cdot CO + \mu_{H_2} \cdot H_2 + \mu_{CO_2} \cdot CO_2 + \mu_{CH_4} \cdot CH_4 + \mu_{N_2} \cdot N_2}{100 \cdot 22.4}$$

$$\rho_{dsg} = \frac{28 \cdot 19.0 + 2 \cdot 18.1 + 44 \cdot 13 + 16 \cdot 0.40 + 28 \cdot 49.5}{100 \cdot 22.4} = 1.131$$

Питомий масовий вихід сухого синтез-газу, кг/кг палива:

$$M_{dsg} = V_{dsg} \times \rho_{dsg} = 2.092 \times 1.131 = 2.366$$

Витрата сухого повітря, м³/кг палива, визначається через вміст азоту в синтез-газі та питомий вихід за рівнянням:

$$V_{air} = \frac{V_{dsg} \times (N_2/100) - N^r/100 \times 22.4/\mu_{N_2}}{0.79}$$
$$V_{air} = \frac{2.092 \times (49.5/100) - 0.40/100 \times 22.4/28}{0.79} = 1.307$$

Витрата кисню, м³/кг палива, становитиме

$$V_{O_2} = 0.21 \cdot V_{air}$$
$$V_{O_2} = 0.21 \cdot 1.307 = 0.275$$

Масова витрата сухого повітря, кг/кг палива:

$$M_{air} = V_{air} \times \mu_{air}/22.4$$
$$M_{air} = 1.307 \times 28.95/22.4 = 1.690$$

Вологоміст повітря, кг/кг сухого повітря, визначається на рівні

$$d = M_w/M_{air} = 0.01$$

Масовий потік вологи повітря, кг/кг палива

$$M_w = M_{air} \times d$$
$$M_w = 1.690 \times 0.01 = 0.0169$$

Об'єм вологи повітря, м³/кг палива:

$$V_w = M_w \times 22.4/\mu_{H_2O}$$
$$V_w = 0.0169 \times 22.4/18 = 0.0210$$

Вміст вологи в сирому синтез-газі, кг/м³ сухого синтез-газу :

$$f_m = \frac{(\mu_{H_2O}/\mu_{H_2} \times H^r + W^r)}{100 \times V_{dsg}} + \frac{M_w}{V_{dsg}} - \frac{\mu_{H_2O}}{22.4} \times \frac{H_2 + 2 \cdot CH_4}{100}$$
$$f_m = \frac{(18/2 \times 3.55 + 30.0)}{100 \times 2.258} + \frac{0.0169}{2.258} - \frac{18}{22.4} \times \frac{18.1 + 2 \cdot 0.4}{100} = 0.1523$$

Масовий вихід вологи з синтез-газом, кг/кг палива:

$$G_{H_2O} = f_m \times V_{dsg} = 0.1523 \times 2.092 = 0.3186$$

Об'єм вологи в сирому синтез-газі, м³/м³ сухого синтез-газу

$$f_v = f_m \times 22.4/\mu_{H_2O}$$
$$f_v = 0.1523 \times 22.4/18 = 0.1895$$

Вміст вологи, %, у вологому синтез-газі буде

$$H_2O_r = 100 \times f_v / (1 + f_v)$$

$$H_2O_r = 100 \times 0.1895 / (1 + 0.1895) = 15.93 \%$$

Вміст інших компонент сирого газу (%) розраховується за формулою.

$$N_{2,r} = N_2 \cdot (1 - H_2O_r / 100)$$

$$N_{2,r} = 45.9 \cdot (1 - 15.93 / 100) = 41.67$$

$$CO_r = 19.0 \cdot (1 - 15.93 / 100) = 15.97$$

$$H_2_r = 18.1 \cdot (1 - 15.93 / 100) = 15.22$$

$$CO_{2,r} = 13.0 \cdot (1 - 15.93 / 100) = 10.93$$

$$CH_{4,r} = 0.40 \cdot (1 - 15.93 / 100) = 0.34$$

Баланс масових потоків:

Прихід, кг		Вихід, кг	
Паливо	1,000	Генераторний газ	2.366
Повітря	1.690	Волога газу	0.319
Волога повітря	0.017	Зола	0.015
		Втрати вуглецю	0,005
РАЗОМ	2.707		2.704

Неузгодженість потоків становить 0,09 % і пояснюється округленням величин

Енергетичні характеристики

Теплота згоряння синтез-газу, МДж/м³

$$Q_i^r = 12.706 \times \frac{CO}{100} + 10.760 \times \frac{H_2}{100} + 35.808 \times \frac{CH_4}{100}$$

$$Q_i^r = 12.706 \times \frac{19.0}{100} + 10.760 \times \frac{18.1}{100} + 35.808 \times \frac{0.40}{100} = 4.505$$

Хімічна енергія генераторного газу, МДж/кг палива

$$Q_{out} = Q_i^r \times V_{dsg} = 4.505 \times 2.092 = 9.426$$

Хімічний ККД холодного газу

$$\eta_{ch} = \frac{Q_{out}}{LHV} = \frac{9.426}{12.390} = 0.761 = 76.10 \%$$

Витратні характеристики

За початковими даними номінальна теплова потужність газогенератора становить

$$P = 1 \text{ MWt} = 3.6 \frac{\text{ГДж}}{\text{год}}$$

Витрата генераторного газу, м³/год, становить

$$V_g = P/Q_i = 3.6 \frac{\text{ГДж}}{\text{год}} / 4.505 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3} = 799.06$$

Питома швидкість виходу сухого генераторного газу буде

$$s_{dsg} = \frac{V_g/S}{3600} = \frac{799.06/1.819}{3600} = 0.122 \text{ м/с}$$

Енергетична витрата біомаси P_b розраховується як

$$P_b = P/\eta_a = 3.6/0.761 = 4.730 \text{ ГДж/год}$$

Витрата деревної біомаси, кг/год, становитиме

$$V_p = P_b/LHV = 4.73 \frac{\text{ГДж}}{\text{год}} / 12.39 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 381.9$$

3.2. Розрахунок основних розмірів газогенератора

За емпіричними даними середня напруженість безперервного газогенератора нижнього ходу для біомаси приймається як

$$q = 210 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$$

Тому площа перерізу газогенератора становитиме

$$S = V_p/q = 381.9/210 = 1.819 \text{ м}^2$$

Внутрішній діаметр газогенератора буде:

$$D = \sqrt{4 \cdot S/\pi} = \sqrt{4 \cdot 1.819/3.1416} = 1.522 \text{ м}$$

При насипній густині біомаси $\rho_b = 200 \text{ кг}/\text{м}^3$ лінійна швидкість руху біомаси становитиме:

$$v_b = \frac{V_p/(\rho_b \cdot S)}{60} = \frac{381.9/(200 \cdot 1.819)}{60} = 0.023 \text{ м/хв} = 1.4 \text{ м/год}$$

При висоті газогенератора (до решітки) $H_i = 2.0 \text{ м}$ час перебування частинок біомаси в газифікаторі становитиме:

$$\tau = H_i/v_b = 2.0/0.023 = 85.7 \text{ хв} = 1.429 \text{ год}$$

3.3. Розрахунок системи охолодження і очистки газу

Поверхня охолоджувача

$$F_{ох} := 0.05 \cdot \text{м}^2 \cdot \left(\frac{Q_{ГГ}}{\text{кВт}} \cdot 1.36 \right) \quad F_{ох} = 68 \text{ м}^2$$

Для 2-х трубних охолоджувачів з трубами діаметром

$$D_{тр} := 200 \cdot \text{мм}$$

довжина кожної труби становитиме

$$l_{ох} := \frac{F_{ох}}{20 \cdot \pi \cdot D_{тр}} \quad l_{ох} = 2.706 \text{ м}$$

Допустима швидкість газу в очищувачі

$$v_{\text{оч}} := 0.5 \cdot \frac{M}{c}$$

Діаметр очищувача

$$D_{\text{оч}} := \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\Gamma}}{\pi \cdot v_{\text{оч}}}}$$

$$D_{\text{оч}} = 759 \text{ мм} \quad D_{\text{оч}} := 760 \cdot \text{мм}$$

Об'єм насадочних кілець при двох шарах висотою

$$h_{\text{нк}} := 400 \cdot \text{мм}$$

кожний

$$V_{\text{кіл}} := \frac{\pi \cdot D_{\text{оч}}^2}{4} \cdot 2 \cdot h_{\text{нк}} \quad V_{\text{кіл}} = 362.917 \text{ л}$$

ВИСНОВКИ

В роботі проаналізовано потенціал використання біомаси для виробництва енергії в газогенераторах.

Ця тема є перспективною в контексті політики диверсифікації енергопостачання в Україні та збільшення використання палива з нейтральним викидом CO₂.

Залишки біомаси (соняшникову лузгу) можна використовувати в газогенераторах в якості первинного палива, де буде генеруватися вторинне паливо для вироблення теплової та електричної енергії.

Наведено розрахунки для газогенератора нижнього ходу на соняшникових пелетах потужністю 1000 кВт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології , розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетухи. — Київ: Академ періодика, 2022. — 373 с.
2. Алешина А. С., Сергеев В. В. Газификация твердого топлива: учеб. пособие. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 202 с.
3. Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили. — М.: Машгиз, 1955. — 207 с.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию /М.И.Бергер, А.Ю.Вальдберг и др. /Под общ. ред. А.А. Русанова. — М.: Энергоиздат, 1983. —312 с.
5. Методичні рекомендації до викон. випускної кваліфікаційної роботи [Електронний ресурс] на здобуття освіт, ступ. «Магістр» за спец. 144 «Теплоенергетика» освіт.-проф. прогр. «Теплоенергетика та енергоефективні технології» ден. та заоч. форми навч. / уклад. М.О. Прядко, В.М. Філоненко, В.О. Бойко, Н.В. Іващенко - К.: НУХТ, 2021. - 36 с.
6. Woodgas as an Engine Fuel FAO (UN Food and Agriculture Organization) Forestry Division Publication 72, 1998. ISBN 92-5-102436-7. FAO 72.