

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)

«__» _____ 2025 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

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

«__» _____ 2025 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: Газифікатор щільного шару нижнього ходу на біомасі тепловою потужністю 50 кВт

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ТЕ-2-8М

_____ Оберемок Анатолій Олегович
(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

_____ Оберемок
(підпис та прізвище здобувача)

Київ – 2025 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.

“17” вересня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Оберемка Анатолія Олеговича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Газогенератор нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику тепловою потужністю 50 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 17.09.2025 року № 712-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 05.12.2025 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

Висновки

Список використаної літератури

5. Перелік графічного матеріалу

презентація Power Point (слайди)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: 17.09.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд в області використання біомаси в якості палива	18.09-15.10.25	Виконано
2	Типи газогенераторних установок	16.10-04.11.25	Виконано
3	Розрахунок газогенератор нижнього ходу на пелетах соняшнику	05.11-18.11.25	Виконано
4	Оформлення кваліфікаційної роботи	19.11-25.11.25	Виконано
5	Оформлення презентації в середовищі Power Point	25.11-28.11.25	Виконано
6	Попередній захист	01.12.2025	Виконано
7	Захист кваліфікаційної роботи		

Здобувач

_____ (підпис)

Оберемок А.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Вольчин І.В.

_____ (прізвище та ініціали)

З М І С Т

Інформаційний блок	5
Анотація	7
Вступ	9
1. Основи використання біомаси як палива	11
1.1. Газифікація твердого палива	11
1.2. Газифікаційні процеси	24
1.3. Термічна ефективність газогенератора	29
1.4. Фізико-технічні властивості біомаси	30
2. Газогенераторні установки	46
2.1. Газифікація в щільному шарі	49
2.2. Система газифікації нижнього ходу Imbert	70
2.3. Порівняння газогенераторів в киплячому шарі і шарових газогенераторів	79
2.4. Охолодження і очистка газу	81
3. Розрахунок газогенератора нижнього ходу на пелетах соняшнику	90
3.1. Розрахунок газифікатора	90
3.2. Розрахунок основних розмірів газогенератора	95
3.3. Розрахунок системи охолодження і очистки газу	96
Висновки	97
Список використаних літератури	98

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст					
Розроб.		Оберемок А.О.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Вольчин І.В.						4		
Н. контр.								ТЕ – 2– 8М		
Затверд.										

ІНФОРМАЦІЙНИЙ БЛОК

Актуальність дослідження.

У сучасних умовах підвищеної уваги до питань зниження антропогенного впливу на довкілля, зокрема скорочення викидів діоксиду вуглецю (CO₂), особливої актуальності набуває впровадження енергоефективних технологій з використанням відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів є залучення відходів маслоекстракційного виробництва, зокрема лушпиння соняшнику, для отримання теплової енергії шляхом газифікації.

Використання газогенераторів, що працюють на пелетах із біомаси соняшнику, дозволяє не лише зменшити споживання традиційних викопних енергоносіїв, а й забезпечити раціональну утилізацію агропромислових відходів. З огляду на стабільне зростання обсягів виробництва біопалива та наявність значної сировинної бази в Україні, застосування газогенераторних установок нижнього ходу без пережиму є технічно та економічно обґрунтованим.

Таким чином, дослідження конструктивних та теплотехнічних особливостей газогенератора нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику тепловою потужністю 50 кВт є актуальним завданням, що відповідає сучасним тенденціям розвитку малої теплоенергетики та концепції сталого розвитку для малих та середніх підприємств.

Зв'язок дослідження роботи з науковими програмами.

Робота виконана у відповідності плану НДР кафедри теплоенергетики та холодильної техніки НУХТ на 2025 р.

Мета дослідження.

Аналіз можливостей застосування газогенераторів на пелетах соняшнику.

Завдання дослідження.

Рохрахувати газогенератор нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику тепловою потужністю 50 кВт.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси термохімічного перетворення пелет із лушпиння соняшнику з метою отримання газоподібного палива — генераторного газу — в газогенераторі нижнього ходу без пережиму.

Предмет дослідження.

Газогенератор нижнього ходу без пережиму на пелетах соняшнику тепловою потужністю 50 кВт.

Практичне значення отриманих результатів.

Одержані в роботі результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації газогенераторів нижнього ходу.

Особистий внесок магістранта.

Магістрант:

- здійснив літературний огляд публікацій з питань дослідження в області газогенерації із твердого палива та біомаси;
- виконав розрахунки газогенератора тепловою потужністю 50 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 98 стор.

Робота містить 20 таблиць та 32 рисунки.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі розглянуто актуальні питання використання відновлюваних джерел енергії для одержання альтернативного газоподібного палива шляхом газифікації біомаси. Основну увагу приділено процесам перетворення пелет із лушпиння соняшнику в генераторний газ у газогенераторі нижнього ходу без пережиму.

Проаналізовано можливості та основні напрями застосування газогенераторних установок, що працюють на біомасі, а також виконано огляд існуючих конструктивних схем газогенераторів різних типів. Наведено порівняльний аналіз їх конструктивних та експлуатаційних особливостей.

У роботі виконано теплотехнічний та конструктивний розрахунок газогенератора нижнього ходу без пережиму тепловою потужністю 50 кВт, призначеного для роботи на пелетах соняшнику.

Ключові слова: газогенератор, біомаса, генераторний газ, газифікація, пелети соняшнику.

					00.КМР.144.003.002.ПЗ.			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Оберемок А.О.			Анотація	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Вольчин І.В.					8	
Н. контр.								
Затверд.								
						НУХТ каф. ТЕХТ ТЕ – 2– 8М		

ANNOTATION

The qualification work considers the current issues of using renewable energy sources to obtain alternative gaseous fuel by gasification of biomass. The main attention is paid to the processes of converting sunflower husk pellets into generator gas in a bottom-flow gas generator without pinching.

The possibilities and main directions of application of gas generator plants operating on biomass are analyzed, and a review of existing design schemes of gas generators of various types is also performed. A comparative analysis of their design and operational features is presented.

The work performs a heat engineering and design calculation of a bottom-flow gas generator without pinching with a thermal power of 50 kW, designed to operate on sunflower pellets.

Keywords: gas generator, biomass, generator gas, gasification, sunflower pellets.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Біомаса є одним із найбільш перспективних та доступних відновлюваних джерел енергії як у світі, так і в Україні. За обсягами використання у глобальному енергетичному балансі вона стабільно займає одну з провідних позицій серед альтернативних джерел енергії, поступаючись лише традиційним викопним ресурсам. З огляду на зростання цін на природний газ, обмеженість запасів викопного палива та необхідність зменшення негативного впливу на довкілля, інтерес до технологій енергетичного застосування біомаси постійно збільшується.

В Україні існує значний потенціал біомаси агропромислового походження, зокрема відходів переробки олійних культур. Наприклад, лушпиння соняшнику, що утворюється у великих обсягах на маслорекстракційних підприємствах, є цінною енергетичною сировиною завдяки високій теплопродуктивності та стабільним фізико-хімічним характеристикам. Гранулювання такої біомаси у вигляді пелет дозволяє полегшити її транспортування, зберігання та подачу в енергетичні установки, а також забезпечує стабільність процесів термічного перетворення.

Розвиток біоенергетики сприяє зменшенню енергетичної залежності України від імпортованих джерел та відкриває можливості для ефективного використання місцевих паливних ресурсів. Застосування біомаси в енергетиці приносить соціально-економічні вигоди: створюються нові робочі місця, зростають надходження до місцевих бюджетів, знижується собівартість теплової енергії та підвищується надійність тепlopостачання для споживачів. Крім того, наявність реалізованих проектів і державна підтримка відновлюваної енергетики створюють сприятливі умови для подальшого впровадження біоенергетичних технологій.

Біомаса відіграє важливу роль у теплоенергетиці, адже її можна безпосередньо використовувати замість природного газу та вугілля без значних змін у структурі енергопостачання. На відміну від сонячної чи вітрової енергетики, установки на біомасі забезпечують стабільне виробництво енергії та можуть працювати в базовому режимі. Це є суттєвою перевагою як для

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

централізованих систем теплопостачання, так і для автономних енергетичних об'єктів малої потужності.

Одним із важливих напрямів використання біомаси є технологія газифікації, під час якої тверде паливо перетворюється на газоподібне паливо — генераторний газ — в результаті процесів сушіння, піролізу, окиснення та відновлення. Використання газогенераторів дозволяє підвищити ефективність палива, зменшити викиди шкідливих речовин та гнучко регулювати теплову потужність установки. Особливий інтерес становлять газогенератори нижнього ходу без пережиму, що відзначаються простотою конструкції, стабільною роботою та можливістю використання пелетованої біомаси.

Україна взяла на себе міжнародні зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів, що зумовлює необхідність переходу на низьковуглецеву модель розвитку енергетики. Досягнення цих цілей передбачає зниження споживання викопного палива, підвищення енергоефективності та активне впровадження відновлюваних джерел енергії. За прогнозами, у середньо- та довгостроковій перспективі частка відновлюваної енергетики в енергетичному балансі України може значно збільшитися, при цьому біоенергетика здатна забезпечити значну частину цього зростання.

Враховуючи зазначене, дослідження процесів газифікації пелет із лушпиння соняшнику та розробка газогенератора нижнього ходу без пережиму з тепловою потужністю 50 кВт є актуальним науково-технічним завданням. Результати цих досліджень можуть бути використані при створенні ефективних установок малої теплоенергетики, орієнтованих на використання місцевих відновлюваних паливних ресурсів.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Основи використання біомаси як палива

1.1. Газифікація твердого палива [2]

Тверде паливо відзначається високою термічною нестабільністю. Під час нагрівання будь-який його тип зазнає термохімічного розкладу, в результаті якого утворюються леткі сполуки та тверді залишки. Газифікація являє собою процес перетворення твердого палива на горючі газу — переважно CO, H₂, CH₄ та інші, — які можуть використовуватися для подальшого спалювання у теплових установках або як технологічний газ у промислових процесах. Основною метою газифікації є максимально ефективно перетворення палива на газоподібний продукт із мінімізацією енергетичних втрат.

Газифікація може відбуватися за двома основними схемами:

1. Неповне згоряння палива — процес протікає за обмеженої кількості кисню, що сприяє утворенню горючих газів;
2. Реакції відновлення — вуглець взаємодіє з вуглекислим газом та водяною парою, утворюючи горючі газу (CO, H₂). Цей процес є ендотермічним.

На відміну від повільного окислення, інтенсивність реакцій під час газифікації значно вища, а виділення тепла — суттєве. У процесі повного згоряння палива утворюються відпрацьовані газу (CO₂, H₂O) та тверді залишки (шлак, зола), які не здатні до горіння.

Схематично процес газифікації зображено на рис. 1.1. Через складність взаємодії компонентів, високу швидкоплинність реакцій і неможливість повного експериментального контролю всіх стадій процес розділяють на три умовні етапи: нагрівання та сушіння палива;

- нагрівання та сушіння палива;
- піролітичне розкладання — розклад твердого палива з утворенням летких продуктів та карбонізованого залишку;
- газифікація вуглецевого залишку — утворення горючих газів за рахунок взаємодії вуглецю з газоподібними реагентами.

Склад та об'єм газів, що утворюються під час піролізу, залежать від температури, типу палива та швидкості його нагрівання.

						00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

Наприклад, при піролізі за температури близько 550 °С у газову фазу входять водяна пара, смоли, кислоти та неконденсовані гази (CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , C_nH_m). Якщо температура перевищує 800 °С, леткі продукти переважно складаються з CO та H_2 . У таблиці 1.1 наведено середні властивості продуктів піролізу деяких видів твердого палива, згідно з даними дослідження. [3].



Рис. 1.1. Процес газифікації

У таблиці 1.1 наведено середні характеристики продуктів піролізу деяких видів твердого палива [3]. З представлених даних видно, що під час піролізу утворюються карбонізовані залишки, які переважно складаються з вуглецю. Маса цих залишків варіює від 15 до 87 % початкової маси палива і зменшується із віком та ступенем зрілості палива.

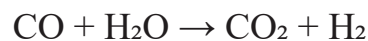
Газифікація вуглецевих залишків призводить до утворення горючих газів. Газ, що утворюється, формується внаслідок реакції вуглецю з газоподібним реагентом, який містить горючий компонент. Як реакційні гази зазвичай використовують повітря, водяну пару, кисень, суміші водяної пари з повітрям або киснем [2].

На рисунку 1.1.2 представлена класифікація методів газифікації залежно від їхнього впливу на сировину. Крім того, на діаграмі показано теплопродуктивність газу, що виробляється різними типами газифікаторів, а також потенційні сфери його застосування.

вуглецю та частково вуглекислого газу, змішану з водяною парою. Водяна пара також дозволяє значно знизити температуру в зоні відновлення та підвищити теплотворну здатність отриманого газу за рахунок додаткового утворення CO і H₂. Такий газ отримав назву водяний генераторний газ.

Порівняно з повітряною газифікацією, парова газифікація забезпечує утворення газів із вищою теплопродуктивністю. Часто застосовують одночасне використання пари та повітря як газифікаторів. У результаті цього процесу утворюється суміш газів і пари — монооксид вуглецю, водень, вуглекислий газ, азот та водяна пара. Таку суміш називають змішаним газом або пароповітряним газом.

Кисень, що міститься в повітрі, постачає енергію, необхідну для екзотермічної реакції згорання палива, а підвищена температура сприяє виділенню летких компонентів із палива. Водяна пара взаємодіє з монооксидом вуглецю, утворюючи водень і вуглекислий газ відповідно до хімічної реакції:



Оптимальна кількість пари, що подається в газогенератор, визначається обсягом тепла, що залишається після реакції відновлення повітря до газу. Надлишок водяної пари знижує температуру в зоні відновлення, що зменшує інтенсивність газифікаційного процесу і може призвести до його припинення.

Якщо в газифікаторі використовується чистий кисень, отриманий газ не містить азоту. Такий газ можна транспортувати трубопроводами, застосовувати у технологічних процесах або як сировину для виробництва хімікатів та синтетичного палива. Проте для цього на підприємстві або поруч із ним необхідна установка з виробництва чистого кисню, що економічно збільшує капітальні витрати. З іншого боку, теплопродуктивність генераторного газу досягає 10–15 МДж/м³, що є високим показником.

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

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

при підвищенні тиску рівновага зміщується в бік утворення CO₂, а при зниженні тиску — в бік збільшення вмісту CO у суміші. Аналогічно, підвищення температури зміщує рівновагу в бік утворення CO, а зниження температури — у бік утворення CO₂.

Склад газів у сумішах, що утворюються під час газифікації твердого палива, значною мірою залежить від температури та тиску в зоні реакцій. При температурах вище 700 °С реакції спрямовані на утворення монооксиду вуглецю (CO), тоді як при температурах нижче 700 °С переважає розклад CO. Підвищення температури сприяє більш повному відновленню CO₂, а при 1000 °С умови сприятливі для майже повного перетворення CO₂ у CO. Зменшення тиску діє протилежно — частка CO₂ у газовій суміші зростає, а вміст CO знижується.

Процес газифікації твердого палива потребує постачання теплової енергії для підтримки необхідної температури в зоні реакцій. Залежно від способу нагрівання виділяють дві основні категорії газифікаційних систем: автотермічні та аллотермічні.

В автотермічних газогенераторах частина палива спалюється всередині реактора, що забезпечує теплову підтримку для газифікації залишку палива та частково формує парогазову суміш, необхідну для процесу. Ця схема популярна завдяки простоті конструкції та нижчим капітальним витратам. Контроль подачі повітря або кисню дозволяє регулювати температуру та склад вихідного газу, а також впливати на виділення смол і летких компонентів.

Аллотермічний метод, або термічне зовнішнє нагрівання, передбачає подачу тепла в зону піролізу та газифікації залишку палива зовні. Тепло може передаватися через стінки газогенератора або шляхом нагрівання частинок палива за допомогою твердого, рідкого чи газоподібного теплоносія. Такий підхід забезпечує стабільну температуру в газифікаційній зоні незалежно від складу палива та швидкості реакцій. До аллотермічних методів також належить плазмохімічна газифікація, де джерелом тепла виступають електроплазмові нагрівачі. У цьому випадку отриманий газ практично не містить інертних компонентів, таких як атмосферний азот, і має високий рівень теплотворної здатності — 12–21 МДж/нм³.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю процесу газифікації є можливість регулювати склад вихідного газу шляхом зміни параметрів процесу. Наприклад, підвищення температури та оптимальний режим подачі пари сприяють збільшенню вмісту водню та монооксиду вуглецю, що підвищує теплопродуктивність газу. Додавання до пари додаткових горючих компонентів, таких як водень або кисень, також дозволяє значно підвищити теплопродуктивність, проте для підтримки необхідної температури в зоні газифікації потрібне додаткове джерело енергії.

Більшість сухих дистилатів, що утворюються під час піролізу, можна спалювати з високою теплопродуктивністю. Це призводить до конденсації газу та підвищення його енергетичної цінності, що особливо важливо для промислових котлів і технологічних установок. Температура згоряння окремих газів наведена в таблиці 1.3, що дозволяє оцінити потенційну енергію, яку можна отримати від різних компонентів газу.

Таким чином, контроль температури, тиску та складу газифікаційного середовища є ключовим фактором для отримання генераторного газу необхідної якості. Це забезпечує можливість його використання в різних технологічних процесах, таких як живлення котлів, двигунів внутрішнього згоряння або як сировини для хімічного синтезу.

Таблиця 1.3

Молекулярна вага, об'ємна вага та калорійність газів

Найменування речовин	Хімічна формула	Молекулярна вага	Вага газу (кг/м ³) фактична	Теплотворна здатність	
				вища	нища
				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 теплопродуктивність генераторного газу в значній мірі залежить від вмісту водню (H₂). Найефективніша робота газогенератора досягається тоді, коли концентрація H₂ у генераторному газі максимально висока, оскільки це безпосередньо підвищує його енергетичну цінність та якість.

У цьому контексті особливе значення має визначення межі поліпшення складу газу при його змішуванні з водяною парою. Ця межа відповідає оптимально збалансованому складу газу (іноді його називають «ідеальним генераторним газом») і може оцінюватися на основі теплових ефектів екзотермічних реакцій (1.12), (1.14) та ендотермічних реакцій (1.13).

Виходячи з масових і молярних балансів, загальну кількість молей утвореного газу можна виразити наступним чином:

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

Такий розрахунок дозволяє визначити оптимальний склад генераторного газу, за якого досягається максимальний вміст водню (H₂), а отже, підвищується його теплота згорання. Використовуючи молярні співвідношення, можна прогнозувати енергетичні характеристики газу та оцінювати ефективність газифікації при різних режимах роботи газогенератора.

**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 при використанні повітря як окислювача включає такі компоненти: CO — 41 %, H₂ — 20,6 %, N₂ — 38,4 %. Теплопродуктивність цього газу можна визначити за допомогою наступного рівняння:

$$Q = \sum_i x_i * L_i$$

де x_i — об'ємна частка компонента у газі,

а L_i — теплота згоряння відповідного компонента.

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

Слід зауважити, що азот (N₂), який надходить у газогенератор разом із повітрям, виступає як інертний баласт, і його частка в ідеальному газі становить 38,4 %. Крім того, реальний процес газифікації супроводжується численними хімічними реакціями, пов'язаними з піролізом, через що неможливо отримати генераторний газ у повністю ідеальному складі. У таблиці 1.4 наведено склад газу для різних типів палива, що відображає реальні умови процесу.

Навіть за використання найпростішого обладнання для налаштування процесу газифікації повне перетворення вуглецю палива в газ неможливе.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Частина його залишається у вигляді смол, що ускладнює спалювання та обробку газу, або переходить у шлак чи тверді залишки. У таблиці 1.5 наведено рекомендації щодо стабілізації процесу та підвищення ефективності газифікації.

Таблиця 1.5

Баланс вуглецю при газифікації, % (вагові)

Параметр	Антрацит	Газове вугілля	Буре вугілля	Торф (кусковий)	Деревина (щепа)
Частка в газі	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, мають якісний характер і можуть змінюватися залежно від конкретної організації процесу та типу газифікаційної установки.

Якщо замість повітря для продувки використовувати чистий кисень, вміст азоту в отриманому газі можна значно зменшити або повністю виключити. Проте в такому випадку суттєво ускладнюється технічна схема установки та умови її експлуатації. У таблиці 1.6 представлені порівняльні дані щодо теплопродуктивності генераторного газу, отриманого при використанні різних окислювачів.

Також слід уточнити термінологію. Сьогодні часто плутають поняття «генераторний газ» та «синтез-газ». Синтез-газ є більш науковим терміном і характеризується специфічним складом, типовим для промислових процесів хімічного синтезу:

$$\text{H}_2 / (2\text{CO} + 3\text{CO}_2) = 1,05.$$

Синтез-газ застосовується як сировина для виробництва органічних сполук, які зазвичай отримують з нафти. Тому він повинен бути практично вільним від домішок, що і визначає його назву — «синтез-газ». Не варто висувати аналогічні вимоги до газів, призначених для використання як паливо, і не слід плутати ці два типи газів.

Також некоректно називати генераторний газ, отриманий із біомаси, біогазом. У вітчизняній технічній літературі під біогазом розуміють газ, який

виробляють із біомаси за допомогою біотехнологічних методів (звідси й назва), основним компонентом якого є метан (CH₄). На відміну від генераторного газу, такий газ переважно використовується для виробництва електроенергії та тепла. У деяких зарубіжних джерелах ці поняття можуть об'єднуватися, проте в технічному контексті вони принципово відрізняються.

Таблиця 1.6

**Нищча теплота згорання генераторного газу за різних способів дуття,
МДж/м³**

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

1.2. Газифікаційні процеси

Існує численна кількість способів використання твердого палива як джерела енергії. Аналіз сучасних технологій дозволяє систематизувати ці дані та виділити декілька основних груп (див. рис. 1.4).

Процеси газифікації палива за своєю природою близькі до процесів спалювання, тому конструкція обладнання для їх реалізації має подібні принципи. Газифікаційні установки характеризуються значною різноманітністю і відрізняються за типом палива, режимом роботи, способом подачі окислювача та іншими технічними параметрами.

Ефективність газифікаційних процесів можна підвищити шляхом збільшення інтенсивності хімічних реакцій, підвищення теплотворної здатності отриманого газу та збільшення одиничної потужності обладнання. До методів підвищення інтенсивності газифікації належать:

- ведення процесу під підвищеним тиском до 2,0–2,5 МПа, що дозволяє прискорити хімічні реакції та збільшити вихід горючих газів;

- збільшення реакційної поверхні палива, наприклад шляхом подрібнення або гранулювання, що сприяє більш ефективному контакту палива з газифікуючим агентом;

Підвищення температури в зоні реакції є ефективним способом збільшення інтенсивності процесів, оскільки в системах із рідким видаленням шлаку температура може досягати 1600 °С, що значно прискорює хімічні реакції та підвищує теплотворну здатність утвореного газу.

Обладнання, призначене для піролізу органічних речовин із виділенням горючих газів, називається газогенератором.

У криогенних технологіях газифікатори іноді називають «британськими» через конструктивну схожість із випарниками зріджених газів. Проте такий тип газифікаторів не є оптимальним для промислового застосування, оскільки характеризується обмеженою ефективністю та складними умовами експлуатації.

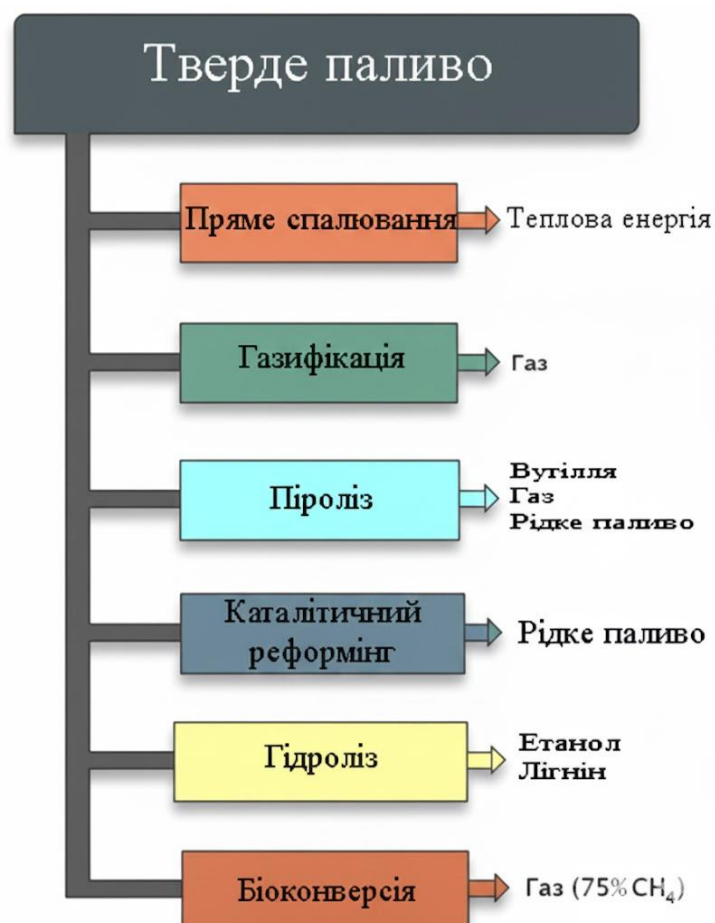


Рис. 1.4. Технології енергетичного використання твердого палива

піролізом, класичні газогенератори, а також різні модифікації автотермічних та аллотермічних систем. Кожна з цих технологій має свої переваги та обмеження. Повільний піроліз забезпечує високий вихід рідких продуктів, тоді як класичні газогенератори краще підходять для отримання газоподібного палива з більш високою теплотворною здатністю. Каталітичний риформінг — це технологія отримання рідкого палива з вугілля та твердих відходів за допомогою різних каталізаторів. Часто її поєднують із піролізом і газифікацією. Для більшості таких процесів необхідні високі тиск і температура. Наприклад:

- Розроблено процес гідрогенізаційного зрідження твердого палива, що здійснюється при тиску водню 6,4 МПа і температурі 350 °С. В результаті з 1 тонни біомаси отримують 24 кг синтетичної нафти та 160 кг бітуму. Цей процес є перспективним для перетворення твердого палива на рідкі енергетичні ресурси та дозволяє отримувати продукти з високою теплотворною здатністю.
- У США функціонує пілотна установка, яка дозволяє перетворювати 1 тонну деревної тріски на приблизно 300 кг рідкого палива типу сирої нафти. Процес відбувається при тиску 28 МПа та температурі 350–375 °С за участю каталізатора — карбонату натрію. Цей метод демонструє потенціал перетворення біомаси у високоефективні рідкі енергетичні продукти з високою теплотворною здатністю та відкриває можливості для подальшого промислового використання.
- Розроблено метод термічного перетворення деревини, який передбачає її розчинення у нафтопродуктових фракціях за тиску 10 МПа та температури 380–450 °С.
- В Інституті органічної хімії РАН створено технологію виробництва рідкого палива з газу, що отримується шляхом повітряної газифікації. Каталітична конверсія газу здійснюється при порівняно низькому тиску (0,1–10 МПа) і температурі 200–250 °С за участю каталізатора. З 1 т сирої сировини виділяють 128 кг компонентів моторного палива, при цьому хімічна ефективність процесу складає 40 %.

					00.КМР.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Наведені технологічні підходи є багатоступневими і не завжди економічно доцільними для впровадження на окремих електростанціях. Найбільш ефективно їх використання спостерігається у великих енергетичних комплексах, де переробка твердого палива інтегрується з сучасними термодинамічними циклами генерації енергії.

Гідроліз є технологією, що базується на чергуванні реакцій розкладу органічних речовин у воді з каталізатором. Наприкінці 1930-х років у Радянському Союзі була розроблена та активно застосовувалася методика отримання етанолу шляхом кислотного гідролізу деревної біомаси. При цьому з 1 тонни рослинної сировини отримували близько 160–180 кг спирту та 300–400 кг гідролізованого лігніну. Енергетичні витрати на процеси гідролізу були значними, проте компенсувалися енергією, що міститься у лігніні.

На сучасному етапі біоконверсія біомаси активно впроваджується у світі через комерційні установки з виробництва біопалива. Один із найбільших прикладів — заводи з виробництва целюлозного етанолу в Європі та Північній Америці. Наприклад, у Кречіно (Італія) функціонує підприємство, що переробляє лушпиння зернових та інші рослинні відходи на етанол із річною потужністю близько 75 млн літрів. Використовується запатентований процес ProesaTM, що передбачає ферментативне розщеплення лігноцелюлозної біомаси із застосуванням спеціальних ензимів, а побічний продукт — лігнін — забезпечує виробництво електроенергії для потреб підприємства.

Такі інтегровані підходи дозволяють не лише перетворювати аграрні та лісові відходи на рідке паливо, а й ефективно використовувати побічні потоки у виробничому енергетичному циклі, підвищуючи загальну енергоефективність та знижуючи потребу у зовнішніх джерелах енергії. Це робить технологію економічно привабливою на великому промисловому рівні.

Ще одним комерційним напрямом є виробництво біогазу та біометану з органічних відходів сільського господарства, тваринництва та харчової промисловості. Біогазові установки моделюють анаеробні процеси бродіння, перетворюючи відходи на метановмісний газ, придатний для виробництва теплової та електричної енергії. Після очищення від CO₂ та домішок біогаз

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворюється на біометан — екологічний аналог природного газу, який можна подавати у газорозподільчі мережі або використовувати як моторне паливо.

Комерційні установки на технологіях INNIO Jenbacher забезпечують стабільне виробництво електроенергії з біогазу із високим вмістом метану (45–87% у сирому газі), що одночасно вирішує проблему утилізації органічних відходів і генерує прибутковий продукт.

Особливу увагу заслуговують проекти з виробництва синтетичного авіаційного та дизельного палива на основі етанолу, що реалізуються у США. Компанія LanzaJet у штаті Джорджія відкрила перший у світі комерційний завод із перетворення етанолу на сталеве авіаційне паливо (SAF) та відновлюваний дизель. Підприємство виробляє мільйони галонів палива на рік із низьковуглецевих джерел, включно з аграрними та муніципальними відходами.

У всіх зазначених прикладах технології біоконверсії інтегруються у виробничі ланцюги, що дозволяє не лише отримувати паливні продукти з біомаси, а й значно скорочувати викиди парникових газів порівняно з традиційним виробництвом палива на основі вичопного ресурсу.

1.3. Термічна ефективність газогенератора

Термічний коефіцієнт корисної дії (ККД) газогенератора використовується для оцінки ефективності перетворення теплової енергії під час газифікації твердого палива. Він характеризує частку енергії, що міститься в отриманому генераторному газі, відносно енергетичного потенціалу вихідного палива. Простими словами, термічний ККД показує, яка частина хімічної енергії палива перетворюється на корисну енергію горючого газу, придатного для застосування в котлах, двигунах внутрішнього згорання або інших споживачах енергії.

Його розрахунок зазвичай проводиться за формулою:

$$\eta_z = \frac{Q_z V_z}{Q_i^r}, \quad (1.17)$$

Термічний коефіцієнт корисної дії (ККД) розраховується як відношення кількості тепла, що виділяється при спалюванні генераторного газу, отриманого з одного кілограма твердого палива, до теплотворної здатності самого палива.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо установка для спалювання може використовувати також смолу, яка утворюється під час газифікації, то у розрахунку враховується сумарна теплота згоряння газу та смоли. У такому випадку ефективність процесу газифікації визначається за відповідною формулою:

$$\eta'_g = \frac{Q_g V_g + Q_c V_c}{Q_i^r}, \quad (18)$$

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 $Q_{ГХ}$ визначається як кількість хімічної енергії, що виділяється за одну годину під час спалювання генераторного газу, виробленого даним апаратом. Простими словами, це теплова потужність газу, яка надходить з газогенератора для використання в котлах, двигунах внутрішнього згоряння або інших споживачах енергії.

Температура газу на виході з газогенератора зазвичай варіюється від 200 до 650 °C і залежить від типу процесу газифікації, характеристик палива та конструкції газифікатора. При досягненні верхньої межі температури значна частина теплової енергії газу залишається у вигляді сенсорного тепла (теплоносія), яке не перетворюється на корисну енергію.

У таких умовах потужність газогенератора з урахуванням втрат тепла газу $Q_{ГФ}$ може становити до 20 % від загальної хімічної потужності $Q_{ГХ}$. Це означає, що при високих температурах вихідного газу частина енергії втрачається на нагрівання навколишнього середовища або конструкцій газогенератора. Для більш точного визначення корисної потужності установки необхідно враховувати ці теплові втрати. Зниження температури газу на виході або застосування теплообмінників дозволяє підвищити ефективність процесу газифікації та оптимізувати ККД газогенератора.

1.4. Фізико-технічні властивості біомаси

Склад та фізико-технічні характеристики рослинної біомаси значною мірою залежать від походження сировини, її ботанічного виду та умов вирощування. Ці властивості безпосередньо впливають на процес газифікації та ефективність

							00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				

перетворення хімічної енергії палива в корисну.

Основні параметри, що визначають придатність біомаси для енергетичного використання, включають вологість, зольність та щільність.

Вологість біомаси може сильно варіюватися і визначається кліматичними умовами, способом зберігання та біохімічним складом рослини. Наприклад, деревина хвойних і листяних порід або очерет можуть містити до 50 % вологи, що суттєво знижує теплотворну здатність і збільшує енергетичні витрати на попереднє сушіння перед газифікацією. У той же час сільськогосподарські відходи, такі як солома, стебла кукурудзи або лушпиння насіння, зазвичай мають вологість близько 10–12 %, що робить їх більш придатними для безпосереднього використання в газогенераторах без додаткової обробки. Висока вологість також спричиняє додаткове споживання енергії на випаровування води під час піролізу або газифікації, що знижує термохімічний ККД процесу.

Вміст мінеральних речовин (зольність) у біомасі теж суттєво впливає на енергетичні показники та експлуатаційні характеристики газогенераторів. Деревина зазвичай містить близько 0,5 % золи, до складу якої входять карбонати, карбоксилати та незначна кількість кремнію. Така зольність майже не впливає на тепломісткість газифікаційного процесу і лише трохи підвищує ймовірність утворення шлаку. Натомість солома рису, пшениці або кукурудзи може мати до 20–30 % золи, що знижує теплотворну здатність та спричиняє інтенсивніше налипання й абразивний знос обладнання. Нерозчинні у воді мінеральні сполуки, такі як кремній або фосфати, можуть формувати шлакові відкладення на стінках реактора, що потребує застосування спеціальних систем очищення або періодичного промивання газогенератора. Для оцінки фізико-технічних властивостей різних видів біомаси використано комплексний підхід. Було проаналізовано:

- сільськогосподарські відходи (лущення соняшника, рисове та вівсяне лушпиння, кукурудзяні стебла);
- гідролізовані промислові відходи, зокрема лігнін і залишки деревної промисловості;

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- результати експериментів ВТІ та сучасні дані незалежних досліджень іноземних авторів.

Такий підхід дозволяє формувати узагальнені показники вологості, зольності, щільності, теплотворної здатності та хімічного складу біомаси, що необхідні для проектування ефективних газифікаційних установок і підвищення енергетичної ефективності процесу. Урахування різноманітності сировини також дає змогу прогнозувати потенційні проблеми, такі як надмірне утворення смоли, налипання золи або потреба у попередньому сушінні, що безпосередньо впливає на вибір технології та режимів роботи газогенератора.

Деревні відходи

Нижче наведено типові характеристики кородресних відходів Архангельського целюлозно-паперового комбінату. Оскільки паливо є неоднорідним за складом, для оцінки його енергетичних властивостей були використані середньозважені показники технічних характеристик.

Зольність визначалась відповідно до ГОСТ 1.1.022-90, вологість — за ГОСТ 27314-91, летючі речовини — за ГОСТ 6382-91, вуглець і водень — за ГОСТ 24081-88, сірка — за ГОСТ 8606-93, а вміст кисню визначався як різниця між одиницею та сумою інших компонентів. Теплота згоряння палива визначалась згідно з ГОСТ 147-95.

Результати проведених аналізів для розрахунку використаної маси представлені в таблиці 1.7, а елементний склад золи — у таблиці 1.8. Слід відзначити, що склад палива та золи в розрахунку на суху масу для інших ТЕЦ суттєво не відрізняється від наведених даних. Вологість деревних відходів у середньому коливається в межах 45–60 %, залежно від умов зберігання та пори року.

Відходи деревообробних підприємств зазвичай включають суху тріску, тирсу та подрібнені залишки деревини, що є типовим для виробництв, які виготовляють віконні блоки, меблі та іншу високотехнологічну продукцію. У таких відходах переважають суха тирса та стружка. Виняток становлять відходи шліфування деревно-стружкових плит (ДСП), які містять абразивні частки та смолу, що ускладнює процеси спалювання або газифікації.

					00.КМР.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Вологість зразків відходів, зібраних у пунктах зовнішнього збору, становить близько 27 %, а теплота згоряння — приблизно 17,2 МДж/кг. Оскільки вологість може зростати восени та взимку, для попередніх розрахунків теплота згоряння палива приймалась як 16,75 МДж/кг при вологості 10 %.

Питома вага деревних відходів становить лише 150 кг/м³, що вказує на їх пористу структуру та легкість. Близько половини відходів складають дрібні частинки розміром 0,2–1 мм, решта — тріска та тирса довжиною до 50 мм. Така неоднорідність розмірів частинок має значення при проектуванні подачі палива в газогенератори або печі, оскільки великі шматки можуть призводити до нерівномірного піролізу, уповільнювати процес газифікації і знижувати ККД обладнання.

Для підвищення ефективності використання деревних відходів у енергетичних установках рекомендується подрібнення та сортування частинок за розміром, а також попереднє сушіння, особливо в холодний період. Це забезпечує стабільність теплотворної здатності палива та оптимізує роботу газогенераторів, котлів або піролізних установок.

Сільськогосподарські відходи

Теплота згоряння досліджуваного палива визначалась відповідно до ГОСТ 147, зольність — за ГОСТ 1.1022, а вологість — згідно з ГОСТ 27314. У таблиці 1.9 наведено результати технічного аналізу низки зразків сільськогосподарських відходів, висушених на повітрі у ґрунтових умовах.

Слід зазначити, що в реальних умовах сільськогосподарського виробництва вміст вологи у відходах може бути трохи вищим, ніж наведено в таблиці — на 2–4 %. Це призводить до зменшення теплотворної здатності палива, оскільки частина енергії витрачається на випаровування води під час спалювання або газифікації.

Відмінності у зольності визначаються присутністю або відсутністю домішок, таких як частки ґрунту, пилу, залишки насіння або мінеральні компоненти рослин.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з літературними даними, найнижча теплота згоряння для аналогічної сировини становить:

15,9 МДж/кг — солома льону;

14,3 МДж/кг — бавовняна солома (чингарак);

14,5 МДж/кг — стебла бавовни (гузопа);

13,3 МДж/кг — рисове лушпиння;

15,4 МДж/кг — лушпиння соняшника;

15,7 МДж/кг — солома інших культур.

Таким чином, теплота згоряння сільськогосподарських відходів знаходиться в межах 13,3–17,1 МДж/кг, що свідчить про їхній відносно високий енергетичний потенціал. Середній вміст вологи природних відходів становить близько 10 %, а зольність — приблизно 5 %.

Для точного використання таких відходів у технологічних процесах — газифікації, піролізі або спалюванні в котлах — слід враховувати сезонні коливання вологості та зольності. Наприклад, восени та взимку через підвищену атмосферну вологість теплота згоряння може знижуватися на 5–10 %, а вологість досягати 15–20 %, що негативно впливає на ефективність процесів і економічну доцільність застосування цих матеріалів.

Крім того, важливим фактором є розмір та щільність частинок, оскільки вони визначають швидкість та рівномірність горіння або газифікації. Дрібні частинки нагріваються швидше і повністю реагують, тоді як великі шматки можуть створювати холодні зони та неповне перетворення енергії. Тому для промислового використання сільськогосподарських відходів рекомендується здійснювати попереднє подрібнення та сушіння сировини, що дозволяє стабілізувати тепловіддачу та підвищити ефективність енергетичних установок.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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 теплотазгорання, 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 сільськогосподарських відходів представлено в таблиці 3.4. Вуглець і водень визначали за ГОСТ 2408, азот — за ГОСТ 28743, сірку — за ГОСТ 8606, а інші елементи, зокрема кисень, обчислювали як різницю між 100 % і сумою всіх інших компонентів.

Аналіз показав, що відходи мають високий вміст вуглецю — близько 50 % та кисню — приблизно 42 %. Невелика концентрація сірки і помірна кількість азоту свідчать про те, що при спалюванні або газифікації викиди шкідливих сполук, таких як SO₂ і NO_x, навряд чи перевищуватимуть 600 мг/м³, що робить їх відносно безпечними

для використання на промислових установках.

Ці відходи характеризуються високою реактивністю завдяки значному вмісту летких сполук — близько 80 %. Такий показник сприяє швидкому розкладанню сировини, інтенсивному утворенню горючих газів і полегшує запалювання. Водночас це зумовлює необхідність контролю процесу спалювання або газифікації, щоб уникнути утворення надмірного диму або конденсату смолистих речовин.

Для ефективного використання сільськогосподарських відходів у котлах, газогенераторах чи піролізних реакторах важливо враховувати не лише елементний склад, а й такі характеристики, як розмір і щільність частинок, вологість та теплота згоряння. Високий вміст летких речовин дозволяє застосовувати методи швидкої газифікації або флеш-піролізу, підвищуючи вихід генераторного газу та рідких фракцій.

Значна частка вуглецю та водню робить відходи придатними для виробництва синтез-газу, рідкого палива або біогазу, особливо при використанні сучасних технологій термохімічної або біотехнологічної переробки. При ферментації та зброджуванні сировина забезпечує високу продуктивність біопалива, тоді як низький вміст сірки мінімізує ризик корозії обладнання та утворення кислотних компонентів у газових потоках.

Отже, сільськогосподарські відходи демонструють стабільні енергетичні та екологічні показники, що робить їх перспективною сировиною для промислового використання у різних технологіях переробки біомаси.

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 складової, мінеральна частина біомаси демонструє значну змінність у складі. Особливо це стосується оксиду кремнію (SiO₂), вміст якого може коливатися від 40 до 87 %, оксиду заліза (Fe₂O₃) — від 0,2 до 7,7 %, оксиду кальцію (CaO) — від 0,6 до 30,6 % та оксиду калію (K₂O) — від 6,2 до 20 %. Такі відмінності визначають фізико-хімічні властивості золи та її поведінку під час спалювання або газифікації.

Мінеральні компоненти, на відміну від органічних, які впливають на теплотворну здатність палива, безпосередньо визначають утворення шлаку, корозійні процеси на поверхнях і температурний режим процесу. Забруднення поверхонь теплового обладнання зазвичай незначно впливає на більшість елементів, за винятком лужних, особливо калію, який здатний викликати налипання золи та спікання на стінках котлів або газогенераторів.

Температура розм'якшення золи, визначена після озолення в муфельній печі, становить приблизно 1300 °С, із можливим діапазоном 1200–1400 °С залежно від складу мінеральної фракції. Висока температура розм'якшення свідчить про придатність такої біомаси для високотемпературних процесів газифікації та піролізу, що зменшує ризик утворення шлакових відкладень.

Мінеральний склад біомаси суттєво впливає на агресивність золи: високий вміст калію та кальцію може спричиняти утворення легкоплавких сполук, що потребує додаткового охолодження або видалення шлаку. Це враховується при проектуванні котлів і газогенераторів, виборі режимів роботи та технологічних параметрів, таких як температура і швидкість подачі палива. Отже, мінеральний склад є ключовим фактором для прогнозування поведінки палива у термохімічних процесах, якості генераторного газу та запобігання технологічним проблемам, зокрема налипанню, спіканню чи корозії обладнання.

Лігнін — складна трифазна система, що включає тверду фазу, воду та повітря. Частинки технічного лігніну мають розмір від кількох сантиметрів до менше одного мікрона та переважно витягнуті (коефіцієнт подовження 2,2–2,4), що впливає на транспортування, подрібнення та термічну обробку: дрібні частинки утворюють пил, великі потребують механічного подрібнення для рівномірної газифікації.

Таблиця 1.12

Газифікаційні характеристики лігніну

Характеристики	Лігнін	
	деревний	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^p , % об	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^c , МДж/кг	23,958	21,025
A^c , %	3,35	19,0
S^c , % об	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^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

Лігнін, отриманий кислотним гідролізом, містить 40–88 % власне лігніну, 13–45 % важкогідролізованих полісахаридів, 5–19 % смол (лігногумінових сполук) та 0,5–10 % золи. Цей склад визначає енергетичну цінність і специфіку термічних процесів: полісахариди і смоли впливають на утворення летких речовин, швидкість піролізу та потенційне забруднення обладнання смолистими продуктами.

Вологість природно-гідролізованого лігніну зазвичай становить 65–68 %, інколи понад 70 %, що знижує плинність матеріалу і ускладнює подачу в газогенератори та сушильні агрегати. Попереднє сушіння дозволяє нормалізувати технічні властивості та зменшити втрати летких речовин. Лігнін зберігає значну частину сонячної енергії, поглиненої рослинами під час росту. Наприклад, у хвойних деревах із вмістом 42 % целюлози, 27 % геміцелюлози і 28 % лігніну внесок лігніну у теплотворну здатність палива складає 39 %, целюлози — 34 %, а геміцелюлози — лише 2 %.

Піроліз лігніну починається лише після досягнення порогового вмісту вологи $W_{гр}$, нижчого за критичну вологість $W_{кр}$. До цього енергія витрачається переважно на випаровування води, а хімічні реакції летких речовин не відбуваються у значних масштабах.

Початок відщеплення летких спостерігається при нагріванні поверхні до 140–143 °С, при активаційній енергії 36,9–103 кДж/моль. Інтенсивний піроліз триває при 200–600 °С, швидкість якого залежить від розміру та вологості частинок.

										Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

00.KMP.144.003.002.ПЗ.

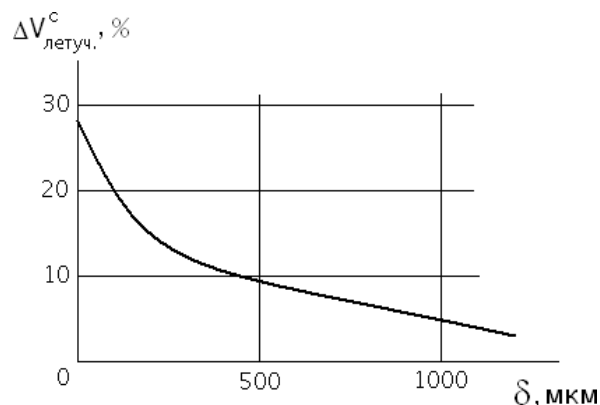


Рис. 1.5. Залежність втрати летких речовин (за сухою масою) від розміру частинок лігніну при початковій вологості лігніну 55-60%

Внутрішнє перенесення тепла та маси визначає ефективність виділення летких речовин: висока пористість сприяє рівномірному нагріванню, тоді як щільні або вологі частинки уповільнюють процес і можуть викликати локальні перегріву. Для ефективної газифікації лігніну рекомендовано попереднє сушіння до вологості 10–12 % та подрібнення до оптимальної фракції, що забезпечує рівномірний контакт з газифікуючим агентом і підвищує продуктивність газогенератора та теплотворну здатність генераторного газу.

Торф.

Торф — це продукт часткового розкладу рослинних решток та органічних елементів, які ще не зазнали повного розпаду. Ступінь розкладу зростає з глибиною залягання, що визначає фізико-хімічні властивості та енергетичний потенціал торфу. Виділяють верховий, низинний та змішаний торф.

У природному стані торф характеризується високим вмістом вологи, що ускладнює його пряме використання як палива. Тому перед застосуванням у технологічних процесах торф обов'язково піддають попередньому сушінню. Вологість повітряно-сухого торфу становить 15–25 %, а у болотистих або глибоких покладах може перевищувати 80 %. Висока вологість знижує теплотворну здатність і економічну доцільність використання торфу.

потенціал та розрахувати ефективність застосування в газогенераторах. Також варто відзначити, що наявність мінеральних домішок у торфі може впливати на перебіг хімічних реакцій під час піролізу, наприклад, змінювати співвідношення CO і CO₂, а також впливати на стабільність смол і конденсатів. Це є важливим при проєктуванні теплообмінного та газоочисного обладнання. Крім того, пористість і внутрішня структура торфу визначають швидкість дифузії газів всередині матеріалу, що безпосередньо впливає на його теплотворну здатність і ефективність газифікації.

Таблиця 1.13

Продукти розкладання торфу за різних температур

Вихід продукта (на суху масу)	Температура, °С			
	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, %	82,0	77,9	72,3	63,4
CO ₂				
C _m H _n				
CO	–	40,6	15,4	16,54
Напівкокс	76,3	54,0	46,35	41,30

Деревина

У цьому розділі представлені дані про склад (табл. 1.14) та фізичну структуру деревини. Для ілюстрації розглянуто два типи деревини – хвойні та листяні породи, оскільки їхні фізико-хімічні характеристики значно відрізняються, що безпосередньо впливає на процеси сушіння, піролізу та газифікації.

Варто відзначити, що деревина має анізотропні механічні властивості та різні коефіцієнти теплового розширення вздовж різних просторових осей.

Наприклад, соснова деревина розширюється вздовж волокон приблизно в 20 разів більше, ніж у поперечному напрямку. Це призводить до виникнення механічних напружень при нагріванні до температур піролізу (250–450 °С). У результаті таких напружень у деревині з'являються макрота мікротріщини, що суттєво збільшують контактну площу з киснем та іншими реагентами, прискорюючи процес сушіння та хімічного розкладу. Під час нагрівання виділяються леткі гази та пари, серед яких переважають:

- водяна пара (H₂O),
- чадний газ (CO),
- вуглеводневі сполуки (C_nH_m),
- смоли та фенольні сполуки,
- бензол та інші ароматичні речовини.

Ці продукти частково конденсуються у вигляді рідких піролізатів, які можуть застосовуватися як паливо або як хімічна сировина. Тверді залишки, що утворюються після виділення летких речовин, складаються переважно з вуглецю та золи і можуть використовуватися як паливо у твердому стані або як компонент у технологічних процесах, що потребують каталізаторів чи адсорбентів.

Фізична структура деревини суттєво впливає на швидкість піролізу: пориста та волокниста будова хвойних порід сприяє швидшій дифузії газів, тоді як листяні породи зазвичай мають більш щільну структуру, що уповільнює вихід летких компонентів і подовжує час хімічних реакцій.

Важливе значення мають також теплопровідність деревини та розподіл вологи всередині волокон. Висока вологість серцевини деревини уповільнює прогрівання та початок піролізу, тоді як сухі зовнішні шари реагують швидше. Це призводить до неоднорідного розкладу та формування зон з

									Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

00.KMP.144.003.002.ПЗ.

різним вмістом летких речовин і вуглецю, що слід враховувати при проектуванні промислових газогенераторів.

Таким чином, поєднання анізотропії, мікротріщин, пористості та вмісту вологи визначає як кінетику виділення газів, так і якість отриманих піролізних продуктів. Ці особливості роблять деревину ефективним матеріалом для процесів газифікації, проте вимагають точного контролю температури та умов нагрівання для досягнення оптимальних енергетичних характеристик.

Таблиця 1.14

Склад деревини

Порода дереини	Зола, %	Склад, %			
		Речовини, не розчинні у воді	Лігнін	Гемицеллюлоза	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 у твердому паливі є важливим показником, що визначає режим горіння та ефективність тепловіддачі. У літературі наводяться різні дані щодо вмісту летких речовин у деревині, торфі та інших органічних відходах: значення коливаються в широкому діапазоні — від 65 до 87 % за обсягом. Основними факторами такої розбіжності є методика визначення, температура піролізу, тривалість перебування частинок у високотемпературному середовищі та присутність домішок.

Високий вміст летких речовин робить паливо більш реактивним та забезпечує інтенсивне початкове горіння, що особливо важливо для промислових котлів і газогенераторів. Низький рівень летких компонентів, навпаки, призводить до повільного розкладу та потребує додаткового підігріву для підтримки стабільного горіння.

Дослідження також охоплювали можливості енергетичного використання твердих побутових відходів, включаючи медичні відходи, шлам целюлозно-паперових комбінатів, а також залишки харчового та агропромислового виробництва. Ці матеріали характеризуються значним різноманіттям фізико-хімічних властивостей, що впливає на їхню горючу здатність та способи використання: варіюються за морфологічним складом (волокнисті, гранульовані, порошкоподібні),

- демонструють нестабільність фізико-хімічних властивостей,
- можуть містити небезпечні або токсичні речовини, що обмежує або забороняє пряме спалювання.

Застосування цього виду палива потребує попередньої обробки, яка включає сортування, видалення небезпечних компонентів, механічне подрібнення та сушіння. Часто використовують комбінований підхід, коли тверді відходи змішують з деревною або аграрною біомасою для стабілізації складу та підвищення теплопровідності й теплотворної здатності.

З практичної точки зору такі дослідження дозволяють визначати оптимальні режими газифікації та спалювання, включаючи температуру нагріву, час перебування палива в реакторі та співвідношення повітряно-кисневої суміші. Ці параметри критично важливі для забезпечення стабільного виділення летких компонентів, підвищення теплотворності газів і смол, а також зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Таким чином, навіть матеріали з низькою якістю або підвищеною вологістю можуть ефективно використовуватися як паливо за умови попередньої оптимізації підготовки та технологічного процесу. Це дозволяє отримати максимальну енергетичну віддачу та мінімізувати негативний екологічний вплив.

											00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								

2. Типи газогенераторних установок

Теорія та проектування ендотермічних методів отримання газоподібного палива з твердої сировини наразі розвинені значно менше, ніж методи екзотермічної газифікації, які базуються на частковому або повному згорянні палива. Це пояснюється тим, що ендотермічні процеси потребують зовнішнього джерела тепла для підтримки необхідної температури у зоні газифікації, а також більш точного контролю режимів нагріву, подачі реагентів та складу палива.

В залежності від способу подачі окислювача (повітря, кисень, водяна пара) та гранулометричного складу сировини можна виділити три основні підходи до ендотермічної газифікації біомаси, що самонагрівається.:

а) Метод газифікації в герметичних установках (реактори типу «bubbling bed» або шахтні газогенератори) передбачає повільну подачу повітря або кисню через шар твердого палива, яке самонагрівається. Основними перевагами цього підходу є проста конструкція, відносно низька вартість та можливість використання відходів різного розміру. Недоліками є обмежена продуктивність та нерівномірний розподіл температури в шарі. При цьому велике значення мають розміри частинок палива, їх вологість та пористість, оскільки саме ці характеристики визначають швидкість газифікації та обсяг отримуваних горючих газів.

б) Метод газифікації в псевдозрідженому шарі передбачає підйом і перемішування твердого палива потоком гарячого газу або повітря, що створює ефект «псевдозрідження». Основними перевагами цього підходу є інтенсивний тепло- та масообмін, більш рівномірний прогрів частинок та підвищена продуктивність. Така технологія дозволяє ефективно газифікувати дрібну біомасу та тверді відходи з високим вмістом летких речовин. Недоліком є складність конструкції та необхідність високоточного контролю газового потоку, щоб уникнути «завалювання» шару або утворення локальних гарячих зон.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1. Газифікація в щільному шарі

При газифікації палива в щільних шарах сировина подається зверху у вигляді відносно великих шматків у газогенеруючу шахту, де послідовно відбуваються стадії сушіння, піролізу та власне газифікації. Принцип роботи цього типу реактора базується на опусканні палива під дією сили тяжіння, що забезпечує природне переміщення сировини через різні температурні зони.

Тривалість перебування палива в кожній зоні залежить від його типу, гранулометрії, вологості та хімічного складу, що визначає висоту та розмір кожної зони, а також загальну висоту шахти газогенератора. Завдяки тривалому контакту палива з окислювачем і відносно низькому рівню викидів газу, щільні стратифіковані газогенератори вважаються оптимальними для малопотужних установок (до 5 МВт), де особливо важливі надійність і стабільність процесу.

В залежності від місця подачі повітря або кисню та місця відбору генераторного газу виділяють три основні типи шахтних газогенераторів:

Газогенератори прямої газифікації, де повітря подається знизу, а газ відбирається зверху. У таких установках газ проходить через усі зони палива, що забезпечує повне використання енергії.

Газогенератори зворотної газифікації, де напрямок подачі повітря та відбору газу протилежний, що дозволяє краще контролювати температуру і підвищити вихід горючих компонентів.

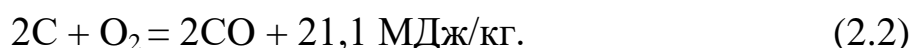
Газогенератори перехресної газифікації, де повітря подається збоку, а газ відбирається горизонтально, що забезпечує більш рівномірний прогрів палива та зменшує утворення шлаку і засмічення зони. Всі газогенератори щільного шару мають чотири основні температурно-функціональні зони:

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- Зона спалювання, де відбувається часткове згоряння палива з виділенням теплоти, необхідної для газифікації нижележачих шарів.
- Зона газифікації, де карбонові залишки реагують з водяною парою і окислювачем, утворюючи горючі гази (СО, Н₂).
- Зона піролізу, де під дією високих температур з палива виділяються леткі речовини, смоли і твердий залишок вуглецю.
- Зона сушіння, де паливо звільняється від вологи, що забезпечує ефективність подальших хімічних реакцій.

Завдяки такій стратифікації забезпечується оптимальне поєднання температури, часу перебування палива та подачі окислювача, що дозволяє отримувати стабільний склад генераторного газу з мінімальними втратами. Шахтні газогенератори такого типу вважаються одними з найнадійніших і економічно доцільних для малих та середніх енергетичних установок. Крім того, вони забезпечують низький вміст пилу та смол у вихідному газі, що спрощує його подальше використання або очищення.

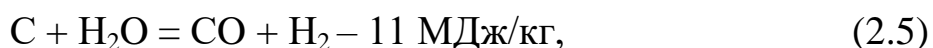
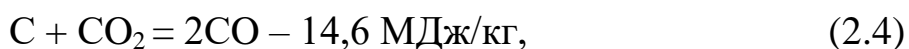
Дві основні екзотермічні реакції в зоні горіння:



У зоні газифікації надходять гази з зони горіння, які мають високу температуру та містять значну кількість кисню і вуглекислого газу. Ці гази реагують з вуглецем і водяною парою палива, що залишилося після стадії піролізу. В результаті цих реакцій утворюються основні горючі компоненти генераторного газу: СО, Н₂ та СН₄.

Реакції в зоні газифікації переважно оборотні та ендотермічні, тобто для їх протікання необхідне постійне підведення тепла. Винятком є метаногенна реакція, яка є екзотермічною і супроводжується виділенням тепла. Найважливішими хімічними реакціями, що визначають склад та теплотворну здатність газу, є:

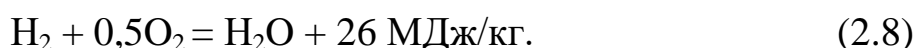
					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



У зоні піролізу хімічні реакції окислення практично не відбуваються через відсутність вільного кисню та недостатню кількість тепла, необхідного для прямого горіння палива. Основними процесами в цій зоні є термічний розклад органічних компонентів біомаси на леткі речовини, смоли, газоподібні продукти та тверді залишки, такі як вуглець і кокс.

Перед початком піролізу частинки біомаси проходять через зону сушіння, оскільки природна вологість матеріалу може коливатися від 10 до 50 % залежно від його походження. У цій зоні відбувається випаровування вологи, що створює необхідні умови для початку термічного розкладу. Процес випаровування вимагає значного теплового ресурсу, який надходить як від нагрітих газів із зони горіння, так і від екзотермічних реакцій, що частково відбуваються в газогенераторі.

Хоча кисень у зоні піролізу практично відсутній, невелика кількість чадного газу (CO) та водню (H₂), що утворюється при розкладі палива, може окислюватися через дифузію газів із зони горіння або залишкові молекули кисню. Ця реакція виділяє тепло, яке частково забезпечує енергетичні потреби зони газифікації, сприяючи підтриманню високої температури та інтенсивності утворення горючих газів. Основна реакція окислення летких компонентів піролізу виглядає наступним чином:



					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$$\alpha = \frac{m_{O_2} / m_{\text{биом}}}{\left(m_{O_2} / m_{\text{биом}} \right)_{\text{ст}}},$$

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

$\left(m_{O_2} / m_{\text{биом}} \right)_{\text{ст}}$ — співвідношення кількості кисню, що подається, і біомаси при стехіометричних умовах, коли здійснюється процес горіння.

Коефіцієнт надлишку повітря (α) є ключовим параметром, що визначає характер реакцій у газогенераторі. Він показує, чи протікає процес піролізу, газифікації або повного горіння:

$\alpha = 0$ — відбувається чистий піроліз, тобто термічний розклад палива без доступу кисню. У цьому випадку утворюються лише леткі продукти, смоли та тверді залишки, а тепло виділяється мінімально, переважно за рахунок внутрішніх екзотермічних реакцій самого палива.

$0 < \alpha < 1$ — протікають процеси газифікації. При невеликому надлишку кисню (зазвичай $\alpha = 0,2-0,4$) тверде паливо повністю перетворюється на горючий газ, що містить CO, H₂ та CH₄ з високою теплотворною здатністю. Такі умови вважаються оптимальними для отримання газу паливного типу.

$\alpha > 1$ — процес переходить у режим повного горіння. У цьому випадку більшість вуглецю окислюється до CO₂, водень реагує з киснем до H₂O, а теплотворна здатність газу значно знижується через меншу концентрацію горючих компонентів.

Зі збільшенням α зростає утворення інертних газів, таких як CO₂ та H₂O, і відповідно зменшується теплотворна здатність газу, оскільки частина потенційної енергії палива витрачається на окислення, а не на формування горючих речовин.

Вибір оптимального значення α є критично важливим для ефективності газифікації, оскільки він дозволяє забезпечити максимальний вихід горючих

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

газів, мінімізувати утворення твердих залишків і контролювати температуру всередині газогенератора. При цьому враховуються тип палива, його вологість, гранулометричний склад та теплотворна здатність.

Крім того, контроль α дозволяє регулювати енергетичну щільність газу для конкретного застосування — від використання в теплових котлах до живлення двигунів внутрішнього згорання або турбін. Низький α забезпечує високий вміст CO і H_2 , роблячи газ придатним для двигунів, тоді як високий α підвищує безпеку і зменшує ризик утворення чадного газу.

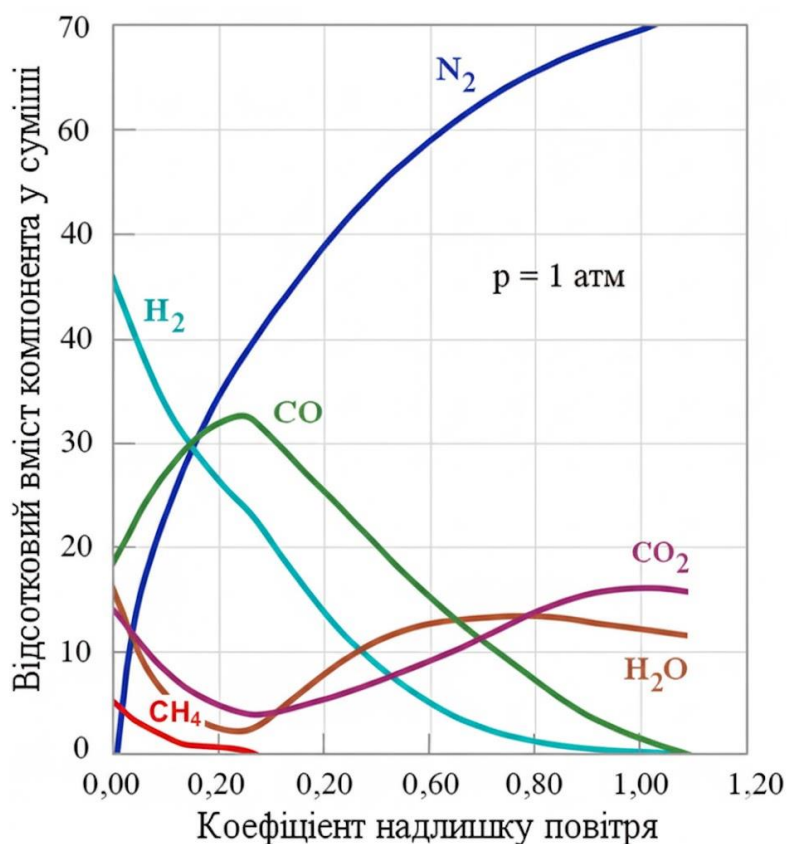


Рис. 2.2. Залежність складу одержуваного газу від коефіцієнта надлишку повітря

При газифікації в нерухомому шарі правильний вибір швидкості подачі надлишку повітря є складним завданням. Просте збільшення швидкості вдування дозволяє досягти заданого значення α , проте одночасне збільшення об'єму поданого повітря не впливає на α , а лише прискорює переміщення біомаси до газогенератора. Через це співвідношення між масою кисню та масою палива ($tO_2/t_{біом}$) залишається практично незмінним.

Склад генераторного газу визначається багатьма факторами: типом газогенератора, характеристиками палива, його вологістю та коефіцієнтом надлишку повітря (α). На рисунку 2.2 графічно показано, як змінюється склад газу при продувці повітрям у реверсивному газогенераторі залежно від α .

З рисунка видно, що при $\alpha = 0,25$ концентрація окису вуглецю (CO) досягає максимуму, а вміст CO_2 мінімальний. У цьому режимі теплота згоряння газу найбільша, оскільки значна частина палива переходить із твердої фази в газову, а утворений газ ще не окислений і не розбавлений азотом із повітря. Зі збільшенням α зростає вміст CO_2 та водяної пари, що знижує теплотворну здатність газу, хоча підвищує безпеку процесу та зменшує концентрацію чадного газу.

Стратифікований газогенератор має вертикальну шахту, внутрішні стінки якої футеровані вогнетривким матеріалом для збереження тепла. Паливо завантажується зверху, а повітря подається знизу через колосникову решітку, що забезпечує рівномірний потік повітря крізь шар палива. Шар підтримується товщиною, достатньою для формування чітких зон: сушіння, піролізу, газифікації та окислення.

Процес виробництва газу в шахті можна розділити на кілька зон (рисунок 2.3):

Зона сушіння (верхня частина шахти) – теплота від вихідних газів та пари висушує паливо, знижуючи його вологість до рівня, необхідного для початку піролізу.

Зона піролізу – під дією високих температур та при відсутності кисню відбувається термічний розклад палива на леткі компоненти, смоли та напівкокс. Леткі продукти піднімаються вгору і змішуються з газами з нижчих зон, збагачуючи паливний газ горючими компонентами.

Зона газифікації – продукти горіння та леткі речовини контактують із гарячим паливом. Тут проходять ендотермічні реакції відновлення,

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

утворюються CO та H₂. Напівкокс піддається газифікації водяною парою та CO₂, що підвищує вміст горючих компонентів у газі.

Зона горіння (нижня частина шахти) – кокс остаточно окислюється до CO₂, забезпечуючи теплом верхні зони. Повітря частково окислює залишки газу і підтримує необхідну температуру для процесів піролізу та газифікації.

Таким чином, стратифікований газогенератор працює за принципом послідовної термічної трансформації палива: від сушіння та піролізу у верхніх шарах до повного окислення та генерації тепла в нижніх. Це забезпечує високу ефективність виробництва горючого газу з мінімальними викидами та дозволяє регулювати його склад за допомогою зміни α, вологості палива або швидкості подачі повітря.

Додатково слід зазначити, що висота та товщина шарів палива, температура зон і швидкість проходження газу безпосередньо впливають на вихід та якість генераторного газу. Оптимальна організація шарів забезпечує високий вміст CO і H₂, зменшення утворення CO₂ і водяної пари, а також мінімізацію кількості нерозщепленого палива у вигляді напівкоксу.

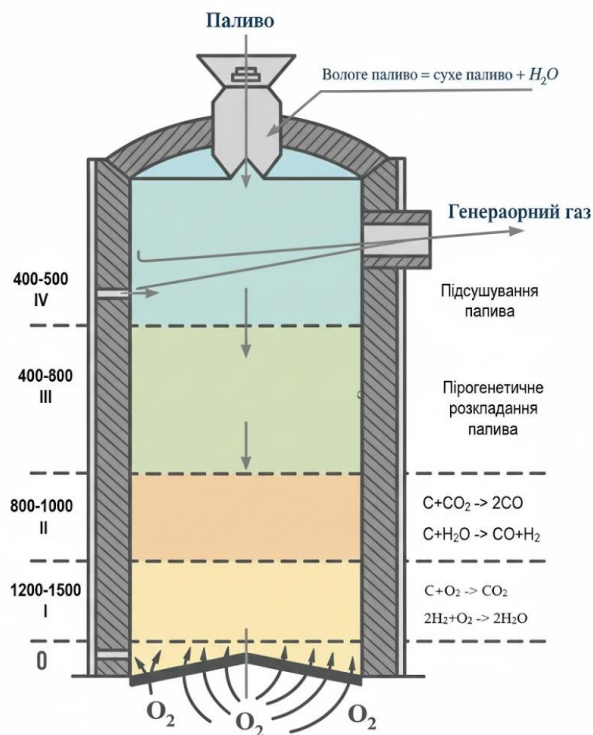


Рис. 2.3. Процеси утворення газів у шарі палива

										Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

00.KMP.144.003.002.ПЗ.

Газогенератори прямого процесу

Генератори прямого технологічного газу відносяться до найдавніших і водночас найпростіших конструкцій, розроблених як для газифікації біомаси, так і вугілля (рис. 2.4). Принцип їх роботи базується на вертикальному розташуванні шару палива: сировина завантажується зверху, а повітря або інший окислювач подається знизу. У зоні горіння відбуваються базові реакції:



Вироблений газ піднімається до верхньої частини шахти, після чого рухається вниз, де частина палива спалюється, виділяючи тепло та продукти згоряння (CO_2 , H_2O). Ці гази рухаються вгору через весь шар палива, проходячи стадії газифікації та піролізу залишків сировини.

В результаті формується газова суміш (CO , H_2 , CH_4), збагачена леткими продуктами піролізу. Верхній шар палива виконує функції сушіння та охолодження газу, а також частково очищає його від пилу та смол, що утворилися. Температура газу на виході коливається в межах $100\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$, залежно від властивостей сировини та режиму роботи генератора.

Основними перевагами генераторів прямого процесу є:

- простота конструкції та експлуатації, що робить їх доступними для невеликих підприємств;
- висока швидкість згоряння палива завдяки оптимальному контакту газу з твердим паливом;
- високий термодинамічний ККД через ефективне використання тепла продуктів згоряння у всіх зонах шахти;
- гнучкість у використанні палива з різною вологістю та фракційним складом;

Невелика кількість пилу у виробленому газі забезпечується завдяки повільному проходженню через шар палива та природному фільтрувальному ефекту зон сушіння та піролізу.

										Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

00.KMP.144.003.002.ПЗ.

Повне окислення золи дозволяє запобігти накопиченню незгорілого вуглецю на колосниковій решітці, що знижує потребу в обслуговуванні обладнання.

Варто також зазначити, що продуктивність генератора газу безпосередньо залежить від розміру частинок палива, його вологості та щільності шару. Дрібні фракції прискорюють піроліз та газифікацію, проте можуть збільшувати аеродинамічний опір шару. Вологость понад 30–35 % здатна зменшити теплотворну здатність газу та вимагати додаткового сушіння.

Таким чином, газогенератори прямого типу забезпечують простий і ефективний спосіб отримання генераторного газу з біомаси або вугілля, поєднуючи послідовні термічні стадії – сушіння, піроліз, газифікацію та окиснення – в одному реакторі.

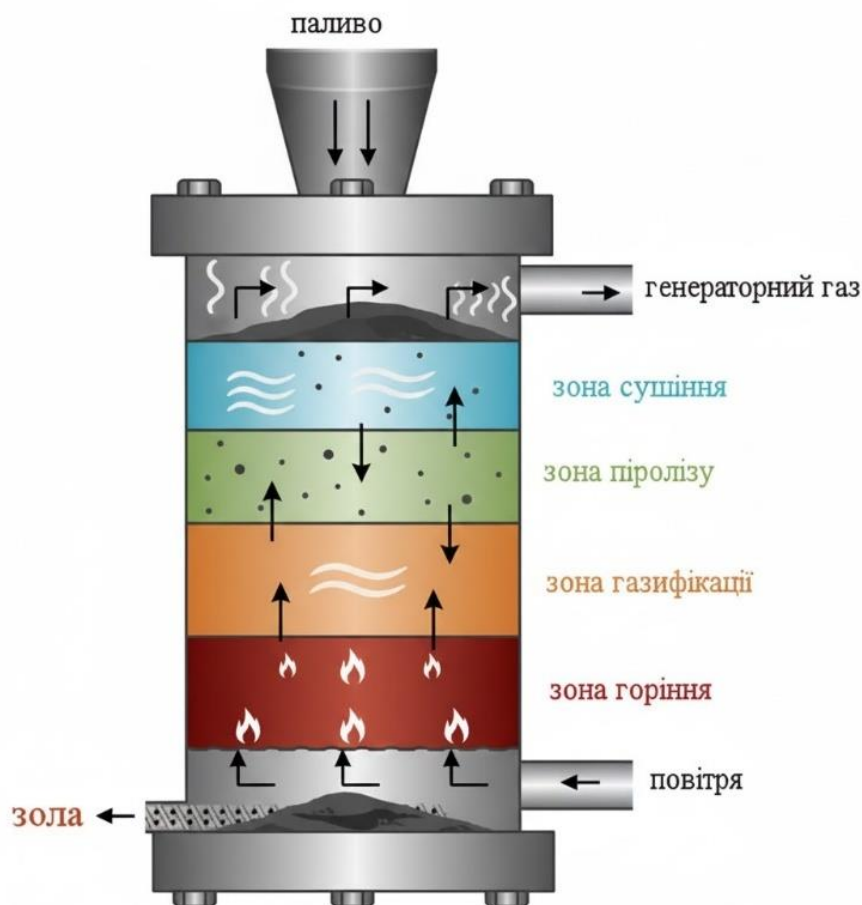


Рис. 2.4. Пошаровий газогенератор прямого процесу газифікації

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Головним недоліком генераторів прямого типу є значний вміст смол у отриманому газі. Це пояснюється тим, що газ відбирається вище зони сушіння палива, де концентрація летких сполук та смол досягає максимуму. Підвищений вміст смол може призводити до забруднення трубопроводів, теплообмінників і двигунів, які використовують генераторний газ, а також знижує його теплотворну здатність. Щоб покращити якість газу, зазвичай застосовують системи проміжного охолодження, конденсації та фільтрації смоли перед його подачею до споживача.

Існує багато конструктивних варіантів газогенераторів шарового типу, які реалізують прямий процес газифікації. Одним із найвідоміших є генератор Bioneer компанії Ahlstrom. Ця установка працює на принципі нерухомого шару палива та забезпечує ефективну газифікацію деревних відходів і біомаси середньої вологості. Вона була впроваджена у промислову експлуатацію у Фінляндії та Швеції з середини 1980-х років і продемонструвала надійну роботу у режимі безперервного виробництва газу. Переваги таких установок включають:

- стабільне отримання газу середньої теплотворної здатності, придатного для використання у теплових котлах і двигунах внутрішнього згорання;
- мінімальні вимоги до підготовки палива, хоча деякі фракції великого розміру можуть потребувати подрібнення;
- простоту обслуговування і ремонту через наявність нерухомого шару та легкої доступності зон горіння і піролізу.

Недоліки, окрім високого вмісту смоли, включають:

- підвищений вміст водяної пари, що може знижувати ефективність подальшого використання газу;
- залежність якості газу від вологості і складу палива, що потребує постійного контролю та регулювання процесу;

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- обмежену модульність і масштабованість, оскільки такі установки оптимальні для невеликих та середніх потужностей (до 5–10 МВт).

Сучасні установки для виробництва генераторного газу обладнані додатковими системами охолодження, циклонами, мокрими скруберами або електрофільтрами, що дозволяє значно знизити вміст смол у газі та отримати більш чистий продукт, придатний для промислового використання та застосування в транспортних технологіях.

Газогенератор «Bioneer»

Газогенератор «Bioneer» є шахтною піччю з нерухомим шаром палива, де паливо подається зверху через газонепроникний живильник, а внутрішні стіни шахти викладені вогнетривкою цеглою і покриті теплоізоляцією для мінімізації тепловтрат та підтримки стабільної температури всередині реактора.

Зволене дуттєве повітря подається через конічну колосникову решітку, що обертається, забезпечуючи рівномірний розподіл повітря і запобігаючи локальному перегріву. Утворений газ піднімається вгору проти потоку палива, проходить через зони газифікації та піролізу й виводиться через верхню трубу газогенератора. Залишковою продукцією є зола, яка вивантажується за допомогою шлюзового живильника, що забезпечує безперервну роботу установки.

Температура над колосниковою решіткою підтримується на рівні 900–1200 °C, щоб запобігти утворенню шлаку. Регулювання температури здійснюється шляхом додавання пари до дуттєвого повітря, що дозволяє адаптувати процес до різних характеристик палива та уникнути перегріву й шлакоутворення.

Теплова потужність газогенераторів цього типу коливається в межах 1–10 МВт, при габаритних розмірах: діаметр 2,2–5,1 м, висота 9,5–11 м, вага 19–34 т. Вони призначені для виробництва горючого газу з різних видів

						00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

твердого палива для спалювання у парових і водогрійних котлах, а також для використання в конвективних сушарках і печах регенерації вапна.

Водночас отриманий газ містить значну кількість смоли, тому безпосереднє використання у двигунах внутрішнього згорання або транспортування на великі відстані можливе лише після попередньої очистки та охолодження.

У середині 1980-х років фінські дослідницькі інститути VTT та Bioneer Оу провели серію випробувань на різних видах сировини: деревна тріска, відходи лісозаготівлі, торф, солома, пелети з горючих фракцій твердих побутових відходів, суміші вугілля з деревною тріскою та суміші твердих побутових відходів з деревною тріскою.

Дослідження проводилися на пілотному газогенераторі потужністю 1,5 МВт. Вміст водяної пари у повітрі становив 0,15–0,19 кг H₂O/кг сухого повітря, а потужність установки регулювалася від 50 % до 100 % номінальної.

Технологічні випробування показали, що склад генераторного газу значною мірою залежить від вологості та фракційного складу палива, а також від режиму подачі дуття. Оптимальна робоча зона піролізу та газифікації забезпечує максимальний вихід горючих газів при мінімальному утворенні смоли, що є ключовим для подальшого використання газу у промислових установках.

Таблиця 2.1

Типовий склад генераторного газу при роботі на трісці вологістю 41 %

CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	Q ^{rs}	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 та введено в експлуатацію дев'ять електростанцій Віонаіг потужністю 4–5 МВт: п'ять у Фінляндії та чотири у Швеції. Чотири з них працювали на деревині або суміші деревини і торфу, а решта — виключно на торфі. Вісім газогенераторів були інтегровані в склад теплових електростанцій, а один — поєднаний із сухою піччю.

Сучасні електростанції на базі газогенераторів Віонеер забезпечують стабільне постачання тепла для регіону, використовуючи вироблений газ у топках водогрійних котлів. Газогенератори повністю автоматизовані, здатні гнучко адаптуватися до характеристик сировини (фракційний склад, вологість) і забезпечують економічно ефективну експлуатацію.

Потреба в паливі для Віонеер:

Вологість < 50 %;

Зольність < 10 %;

Мінімальна температура розм'якшення золи > 1190 °С.

У 1998 році компанія VTT збирила та проаналізувала експлуатаційні дані газогенераторів Віонеер на теплових електростанціях. Результати показали, що на практиці газогенератори стабільно працюють при використанні сировини з вологістю менше 45 % під час нормальної роботи та менше 40 % при тривалій експлуатації на максимальному навантаженні. Порухення цих умов призводить до нестабільного горіння газу з підвищеним вмістом парів смол і води.

Вимоги до якості сировини:

Для ефективного режиму роботи газогенератора, особливо при спалюванні в котлі, найбільш придатною є деревна тріска. Використання розпиленої будівельної деревини може створювати технічні проблеми, оскільки смола в газі часто забиває канали, що з'єднують газогенератор з котлом. У результаті необхідне регулярне очищення газових ходів.

										00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							

Наприклад, на фінській теплоелектростанції газові ходи очищають кожні 2–6 тижнів залежно від характеру сировини та потужності газогенератора.

Крім того, слід враховувати, що вміст смол у газі залежить від вологості та типу сировини: чим вища вологість і більше деревних фракцій із корою, тим інтенсивніше утворюються смоли. Це робить попередню підготовку палива (сушку, видалення кори) критично важливою для безперебійної та економічної роботи установки.

Процес «Purox»

Американська компанія Union Carbide розробила технологію Purox для переробки побутових і промислових відходів у паливний газ середньої теплотворної здатності. В основі процесу лежить пошарова пряма газифікація з використанням чистого кисню для спалювання. Завдяки застосуванню чистого кисню генерований газ не розбавляється азотом, що забезпечує високу теплотворну здатність — приблизно 11,8–15,4 МДж/нм³.

Склад і якість паливного газу залежать від складу та вологості перероблюваних відходів. Продуктовий газ виводиться з реактора при температурі 100–310 °С і може використовуватися безпосередньо як паливо для котелень, обпалювальних і нагрівальних печей, а також як сировина для виробництва хімічних продуктів: метанолу, аміаку та рідких вуглеводневих палив.

У процесі Purox зона горіння газогенераторної шахти досягає температури 1500 °С, що необхідно для видалення рідкого шлаку. Розплавлений шлак у нижній частині шахти скидається в резервуар, де він гранулюється для подальшого використання у будівельних або металургійних технологіях.

Горючі гази, що виводяться з верхньої частини шахти, сильно забруднені летючою золою, парами смол, органічними рідкими кислотами та ароматичними вуглеводнями, тому потребують ретельного очищення перед використанням.

										Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

00.KMP.144.003.002.ПЗ.

Спочатку газогенератори Ругох проектувалися для спалювання неперероблених твердих відходів, але експлуатація показала, що підвищення продуктивності досягається при спалюванні подрібнених відходів, оскільки вони забезпечують більш рівномірний теплообмін та кращу швидкість газифікації. Процес Ругох реалізується через три окремі блоки:

- Блок попередньої обробки сировини – подрібнення, сушка та сортування відходів, видалення металевих та небажаних домішок.

Блок газифікації – власне реактор, де відбуваються сушіння, піроліз та окиснення в середовищі чистого кисню.

- Блок виробництва кисню – забезпечує подачу чистого кисню в зону горіння для оптимальної температури та високої теплотворної здатності газу.

Слід зазначити, що подрібнення та сортування відходів також зменшує утворення смолистих та летких компонентів у генераторному газі, що зменшує навантаження на систему очищення газу та підвищує надійність роботи установки.

Газогенератор Г-3 «СПБГПУ»

Газогенератор Г-3 був розроблений на замовлення Пологівського олійноекстракційного заводу (Україна) і призначений для газифікації лушпиння соняшника та відходів олійноекстракційного виробництва.

Основною особливістю установки є висока ефективність обробки дрібнодисперсної сировини, що дозволяє зменшити втрати енергії та підвищити вихід генераторного газу. Такий підхід робить Г-3 придатним для переробки тонкодисперсних матеріалів із високою продуктивністю та мінімальними технологічними втратами. Експериментальні дані по газифікації лушпиння соняшника наведено в таблиці 2.2.

Характеристика продуктів на виході із газогенератора:

						00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

а) Склад сухого газу, % об.:

CO₂ — 7,0

H₂ — 15,1

CO — 27,6

C_nH_m — 2,2

N₂ — 48,1

б) Пари смол: 14 % на 1 кг сухого лушпиння.

с) Пилоподібні частинки у газі: до 5 г/м³.

Пари кислот (у перерахунку на оцтову кислоту): 6 % на 1 кг сухої сировини.

д) Вологість газу: близько 10 % об., залежно від вологості палива (10 % сировини).

е) Необхідний об'єм повітря для спалювання генераторного газу: ~1 м³.

ф) Температура горіння генераторного газу у повітрі: 1500 °С.

г) Склад золи, %:

SiO₂ — 9,9

Na₂O — 0,8

CO₂ — 5,6

CaO — 17,1

CO₃ — 2,4

Al₂O₃ — 5,3

Li₂O — 0,3

MgO — 22,1

Fe₂O₅ — 1,8

K₂O — 25,9

P₂O₅ — 8,8

Газогенератор Г-3 вирізняється стабільним виходом горючого газу, низьким вмістом пилу та порівняно невеликою кількістю парів кислот і смол у порівнянні з іншими шаровими газогенераторами. Це забезпечує надійну роботу газотурбінних та котельних установок і зменшує потребу у частому очищенні газопроводів.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, завдяки конструктивним особливостям Г-3, можлива автоматизація подачі сировини та регулювання процесу газифікації, що дозволяє адаптувати установку під змінну вологість та фракційний склад лушпиння соняшника.

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) функціонує за схемою прямої газифікації, що передбачає поетапне проходження палива крізь зону сушіння, далі через піролізну ділянку та завершально в газифікаційній зоні. Така послідовність забезпечує раціональне використання теплової енергії палива, сприяє отриманню стабільного складу утворюваного газу та зменшує утворення смолистих і пилових домішок, підвищуючи тим самим ефективність роботи установки.

Конструктивно газогенератор Г-3 включає:

- вал газогенератора, який підтримує обертання колосникової решітки;
- вузол подачі палива, що забезпечує рівномірне надходження лушпиння або інших відходів;
- вузол золовидалення, який гарантує безперервне видалення золи та шлаку;

- систему подачі повітря, що регулює інтенсивність горіння та газифікації;
- систему відбору газу, яка направляє отриманий генераторний газ до споживачів;
- контрольно-вимірювальні прилади, що контролюють температуру, тиск, склад газу та інші параметри;
- систему управління, що забезпечує автоматизацію процесу та стабільність роботи газогенератора.

Основні технічні параметри газогенератора Г-3 наведені в таблиці 2.3.

Цей газогенератор дозволяє ефективно переробляти дрібнодисперсне паливо, що містить значну кількість легких компонентів. Завдяки вдало спроектованим зонам піролізу та газифікації забезпечується стабільний склад утворюваного газу, а також знижений вміст пилу і смолистих домішок. Крім того, конструктивні особливості установки сприяють економії енергоресурсів, що досягається за рахунок оптимальної організації технологічного процесу всередині реактора.



Рис. 2.5. Газогенератор Г-3

Шахта газогенератора побудована із корпусу, всередині якого розташований несучий пояс, що фіксує футеровку з вогнетривкої цегли,

					00.КМР.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечуючи конструкції високу термостійкість та зносостійкість.

Зовнішній кожух шахти виконаний із двох циліндричних секцій різного діаметру, з'єднаних конічним переходом, що сприяє оптимальному руху газів та підтриманню необхідного теплового режиму. Для ефективного підведення пари та регулювання температури корпус обладнано 12 ребрами жорсткості та спеціальними нішами для розміщення датчиків температури, які контролюють три ключові зони: зону горіння, зону газифікації та зону рекуперації золи. Верхня кришка топки обладнана:

- системою подачі палива;
- паливним змішувачем з власним приводом (електродвигун потужністю 3 кВт, частота обертання 1500 об/хв, два редуктори з передавальним числом $Z = 100$);
- системою контролю рівня палива;
- відводом паливних газів з пластинчастим клапаном;
- відводом газів при розпалюванні;
- кришкою для огляду топки.

Мембрана детонаційного клапана виконана з алюмінієвої фольги товщиною 0,3 мм, що забезпечує миттєве реагування на коливання тиску та запобігає виникненню детонаційних явищ у газогенераторі.

Завантажувальний механізм оснащений власним приводом: електродвигуном потужністю 3 кВт із частотою обертання 1500 об/хв та редуктором із передавальним числом $Z = 40$. Це гарантує рівномірне та стабільне подавання палива в шахту, мінімізуючи ймовірність засмічень або нерівномірного горіння.

Такий конструктив дозволяє газогенератору Г-3 ефективно обробляти дрібнодисперсне паливо, підтримувати стабільний температурний режим у всіх зонах та забезпечувати оптимальне формування генераторного газу з високою теплопродуктивністю.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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 газогенератора розташована обертова решітка. Її привод складається з електродвигуна потужністю 3 кВт та частотою обертання 1500 об/хв, а також двох редукторів, що забезпечують обертання решітки зі швидкістю 1,5 об/хв.

На нижньому фланці розташовані дві камери для збору золи, закриті верхньою та нижньою кришками. Газогенератор встановлений на трьох стійках: верхня частина стійки закріплена на конічній цапфі валу, нижня – на фундаменті, що забезпечує стабільність конструкції.

Система подачі пароповітряної суміші включає повітродувку продуктивністю 0,7 м³/с при тиску до 4 кПа, колектор для підведення повітря під лопатки та колосникову решітку, а також трубопровід подачі пари. Регулювання подачі пари та повітря здійснюється за допомогою спеціальних клапанів.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Шнековий живильник подає рисове лушпиння у шахту газогенератора як у циклічному, так і в безперервному режимі, в залежності від умов роботи. Потім шнек вирівнює рівень шару палива і забезпечує рівномірний підйом лушпиння по висоті валу. Під час руху матеріал проходить через зони сушіння, піролізу та газифікації. Температура шару на дні газогенератора досягає 900–1100 °С. Для підтримки горіння піддувається повітря, змішане з водяною парою, що підвищує теплотворну здатність газу завдяки додатковому утворенню водню та чадного газу. Видалення шлаку з колосникової решітки допомагає контролювати температуру зони горіння.

Газ, що піднімається з зони газифікації, проходить через шар лушпиння, сприяючи його сушінню та піролізу, після чого направляється до газопроводу. Залишковим продуктом є зола з частинками незгорілого вуглецю, яка видаляється через обертову решітку у нижній частині газогенератора та накопичується у двох бункерах. Там зола охолоджується до приблизно 70 °С і виводиться при відкритті нижніх заслонок.

У ручному режимі запуск здійснюється за допомогою факела через жарову трубу. Газогенератор працює протягом одного циклу та зупиняється для планового відключення. Автоматичний контроль забезпечує підтримку температури газу у межах 200–300 °С шляхом регулювання рівня палива в шахті. Якщо температура падає нижче 200 °С, шнековий живильник вимикається. При перевищенні 300 °С подача палива збільшується для зниження температури. Якщо температура досягає критичної межі, відбувається автоматичне аварійне відключення подачі газу у газопровід і відкривається клапан на виході до запальної свічки.

2.2 Система газифікації нижнього ходу Imbert [6]

2.2.1 Принцип

Газифікатор нижнього ходу типу Imbert гарантує рівномірний і контрольований рух палива та газів через шар твердого палива, який

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

утримується за допомогою звуженої ділянки, часто названої «горловиною».

Ця конструктивна особливість дозволяє:

- покращити контакт газів і палива, що сприяє більш повному крекінгу смолистих компонентів;
- підвищити температуру газифікації до 650–700 °С, що покращує якість генераторного газу;
- зменшити вміст смол у газі до <1 %, що робить його придатним для використання в двигунах внутрішнього згоряння та котлах.

Паливна біомаса подається у верхній бункер газифікатора, де відбувається її розпушування та подрібнення до однорідних фракцій. Далі матеріал поступово проходить через зони сушіння та піролізу, після чого частково згорає під дією повітря, що надходить через спеціальні форсунки. «Горловина» газифікатора забезпечує інтенсивне змішування продуктів газифікації та твердих залишків, створюючи оптимальні умови для високотемпературного крекінгу смол.

Під горловиною утворені гази проходять крізь розігріте вугілля, де відбувається відновлення CO_2 та H_2O до CO та H_2 , що підвищує концентрацію горючих компонентів у газі та зменшує утворення конденсатів.

Газифікатори нижнього ходу типу Imbert найкраще працюють з однорідним паливом, вологістю менше 20 % та зольністю до 5 %, оскільки великі або нерівномірні частки можуть блокувати горловину та порушувати рух палива і газів. Фізичні обмеження розмірів частинок обумовлюють, що потужність таких установок зазвичай не перевищує 500 кВт, що робить їх оптимальними для малих і локальних електростанцій. Основними перевагами нижнього ходу Imbert є:

- менший вміст смол у газі,
- висока температура вихідного газу,
- відносна простота конструкції та обслуговування,

											00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								

- стабільна робота при постійному завантаженні однорідного палива.

Основним недоліком є зниження загальної теплової ефективності, оскільки велика частина тепла переноситься гарячим газом і не використовується для підігріву палива або відновлення енергії.

2.2.2 Модифікації системи газифікатора нижнього ходу

Горловина газогенератора нижнього ходу створює певні труднощі при роботі з паливом низької щільності. Біомаса у вигляді гілок, паличок або невеликих брусків погано осідає, що може призвести до формування мостів і каналів у зоні піролізу та збільшення кількості смол. Тому ефективність газифікації сильно залежить від фракційного складу та якості вихідної сировини.

Для поліпшення роботи з матеріалом низької та середньої щільності (наприклад, стебла, оболонки зернових) були запропоновані модифікації конструкції газифікатора. Liinanki та співавт. (1985) розробили обертову решітку та подвійну конічну камеру для обробки пилу кокосового волокна, бавовняних стебел та соломи. Пальне ущільнювали у брикети, що мали меншу щільність і більшу зольність, ніж деревина. Подвійний конічний бункер дозволяв брикетам розширюватися під час нагрівання, запобігаючи утворенню мостів, а обертові решітки видаляли частки шлаку до агломерації. Збільшена відстань між дросельною плитою та решіткою сприяла рівномірному розподілу шлаку у зоні відновлення.

Система газифікації також включала циклон для видалення грубого пилу та сітку для дрібних частинок, що забезпечувало холодному газу ККД 72–77 % і вміст смол менше 1 г/нм³. Досліди з пелетами з пшеничної соломи показали, що дуже дрібні частки спричиняють утворення локальних потоків газу між горловиною та соплами, знижуючи ефективність крекінгу смол і підвищуючи їх концентрацію у газі.

Jaуаh та колеги (2003) досліджували газифікацію стружки каучукової

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

деревини (вологість 12,5–18,5 %, розмір 3,3–5,5 см) у газифікаторі потужністю 80 кВт з подвійною стінкою та повітряним проміжком. Під час експлуатації пристрій трясли, щоб уникнути замикання палива у горловині. Менші чіпси швидше перетворювалися на кокс, підвищуючи ефективність газифікації та зменшуючи довжину зони перетворення.

Кут нахилу горловини безпосередньо впливає на температуру, швидкість хімічних реакцій і загальну продуктивність: великий кут знижує ефективність, тоді як менший потребує більшої зони газифікації. Для деревної тріски з вологістю 15 % оптимальні параметри були такими: довжина зони газифікації 22–33 см, розмір тріски 5 см, кут горловини 61°, ефективність перетворення 56 %, а вміст смол, водяної пари та золи становив 7–9 % від обсягу вихідного газу.

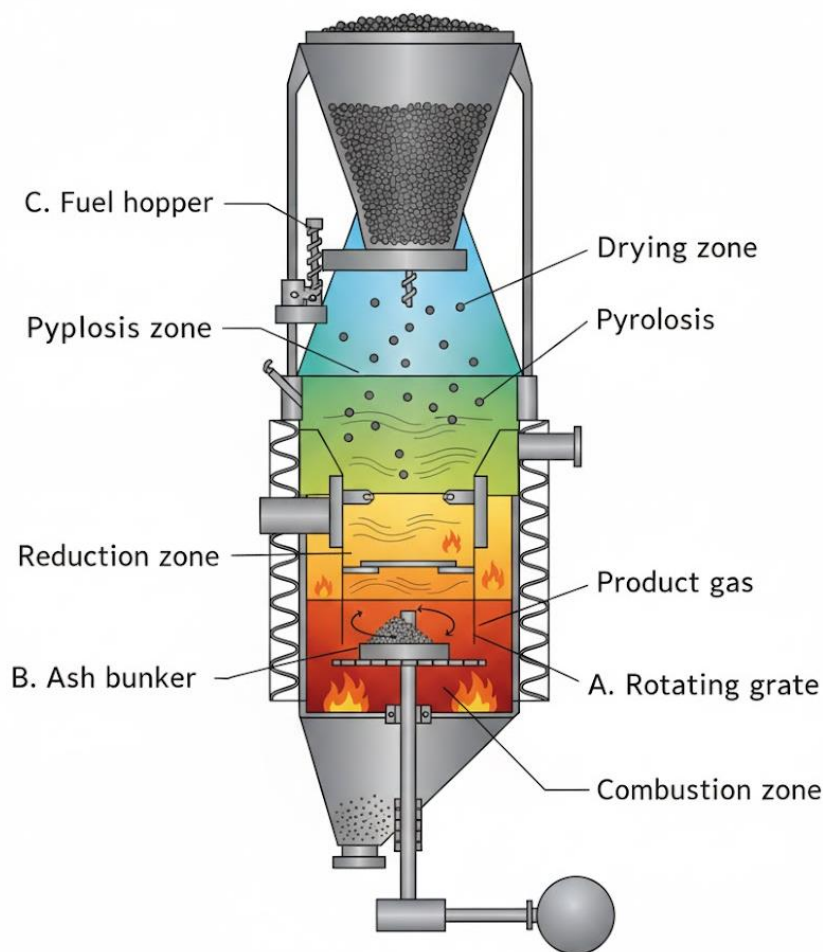


Рис. 2.6. Газифікатор із низхідним потоком, модифікований для недеревної біомаси

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Sasidharan та співавт. (1995) зазначили, що газифікатори нижнього ходу з керамічним облицюванням мають значно більший термін служби та нижчу вартість у порівнянні з аналогами зі сталі для установок потужністю менше 500 кВт. Газогенератори зі сталевим облицюванням зазнавали пошкоджень у зоні горловини та повітряного сопла через високотемпературне окиснення та корозію вже після приблизно 1500 годин експлуатації, тоді як керамічне покриття витримувало інтенсивні термічні удари без значних деформацій. До складу керамічної суміші входили: глинозем (50–70 %), каолін (16–20 %), польовий шпат (10–15 %) і тальк (3–7 %).

Warren та співавт. (1995) у своєму дослідженні газифікатора з низхідним потоком, призначеного для переробки деревної тріски порослевої верби та тополі, скоротили відстань між решітками та збільшили висоту ґрат, щоб запобігти їх засміченню коксом. Мілкі частинки тріски утворювали перешкоди для проходження повітряного потоку, що знижувало локальні температури в зоні горловини. Використання паливного агітатора сприяло перемішуванню деревної тріски, проте повністю проблему перекриття дрібних частинок це не усувало, тому перед подачею в газифікатор їх доводилося видаляти механічно.

2.2.3 Газифікація недеревної біомаси в газифікаторі нижнього ходу з горловиною.

Dogru et al. (2004) та Midilli et al. (2004) досліджували газифікацію залишків брикетованої пилової шкіри (BDLW) у газифікаторі нижнього ходу з початковою вологістю 11,23 % (сухий стан). При збільшенні подачі палива від 2,09 до 5,04 кг/год утворювалась зола в кількості 0,08–0,21 кг/год, гудрон – 0,04–0,06 кг/год, а конденсат – 0,60–1,39 кг/год. Витрати газу з підвищеною вологістю росли майже лінійно: від 3,78 до 9,72 нм³/год із збільшенням масової подачі палива. Частка горючих компонентів у газі становила 29–33 % від загального об'єму. Найефективніша зона газифікації знаходилась у діапазоні питомої швидкості газифікації (SGR) 486,39–

									Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

584,36 $\text{нм}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, де досягалась максимальна ефективність холодного газу – близько 46,5 % при 486,39 $\text{нм}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Великі брикети іноді спричиняли утворення містків у зоні горловини газифікатора.

Midilli et al. (2001) провели газифікацію осаду стічних вод у низхідному газифікаторі потужністю 10 кВт. Вироблений газ містив 19–23 % горючих компонентів із нижчою теплотворною здатністю 2,55–3,2 МДж/нм³. Dogru et al. (2002) вивчали перетворення шкаралупи фундука з вологістю 12 % (сухий стан) у газифікаторі нижнього ходу потужністю 5 кВт. Оптимальна продуктивність установки коливалася від 1,44 до 1,47 нм³/кг при співвідношенні повітря/паливо та 4,06–4,48 кг/год вологої подачі. Якість утвореного газу була високою (ННВ 4,75–5,15 МДж/нм³) завдяки високій температурі в зоні горловини (1015–1206 °С) і низькому вмісту коксу (0,201–0,228 кг/год) та смоли (0,023–0,025 кг/год).

При оптимальній температурі горловини 1000–1050 °С не спостерігалось утворення містків чи плавлення золи, оскільки зольність шкаралупи фундука була дуже низькою – лише 0,77 %. Підвищення подачі повітря понад 1,5 нм³/кг призводило до незначного зниження ННВ газу, але збільшувало утворення смол через інтенсивніше горіння. Отриманий газ піддавали очищенню та охолодженню за допомогою скрубера з насиченим шаром та деревного або вугільного сухого фільтра, що забезпечувало його готовність до подальшого використання.

2.2.4 Застосування газифікатора нижнього ходу з соплом.

Виробничий газ, отриманий із газогенератора нижнього ходу, застосовується для різноманітних теплових потреб, таких як сушіння зерна або як паливо для котлів. Kutz et al. (1983) досліджували використання низхідного газифікатора потужністю 830 МДж/год у поєднанні з камерою згоряння для сушіння зерна. Горловина установки складалася з V-подібних каналів, обрамлених трикутними перегородками, що забезпечували розділення первинного та вторинного повітря. Газогенератор був обшитий

					00.КМР.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

вогнетривкою цеглою та зовнішньою оболонкою з м'якої сталі, а повітря перед надходженням у горловину попередньо підігрівалося через повітропроводи.

При дослідженні сушіння качанів кукурудзи із вологістю 8,1 %, 23,2 % та 32 % було встановлено, що швидкість газифікації зростає лінійно зі збільшенням потоку первинного повітря, водночас з підвищенням вмісту вологи у біомасі швидкість процесу зменшується. Коефіцієнт зменшення швидкості газифікації також знижувався зі зростанням вологості і становив приблизно 3:1 для біомаси з вологістю 8,1 %. Викиди твердих частинок у розрахунку на спожиту енергію склали 134 мг/МДж, що перевищувало стандарти ЕРА для великих вугільних котлів.

Відомо, що газифікатори нижнього ходу з горловиною виробляють газ високої якості з мінімальним вмістом смол, що робить його придатним для роботи двигунів внутрішнього згоряння (Jain, 2006). Sheng (1989) зазначав, що такі установки були комерційно доступні в Китаї і могли використовувати різні види палива, включно з деревиною, кукурудзяними качанами, шкаралупою твердих горіхів, тирсою та кам'яним вугіллям. Вихідний газ характеризувався вмістом CO 20–28 % та H₂ понад 12 %, що забезпечувало його ефективне використання для приводу дизельних двигунів.

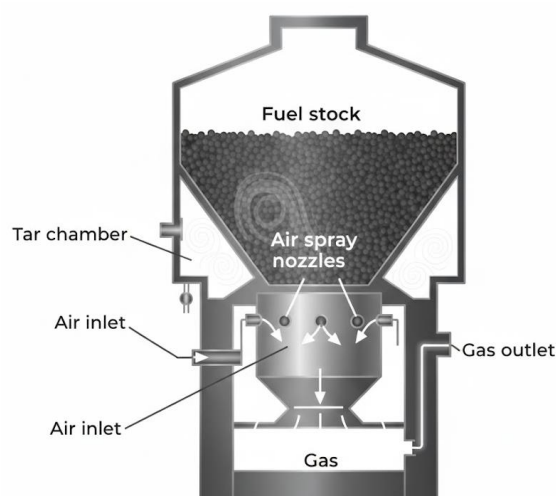


Рис. 2.7. Багатопаливний газифікатор з низхідним потоком

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Warren et al. (1995) досліджували використання низхідного газогенератора з горловиною для переробки деревної тріски верби та тополі. Вироблений газ проходив багатоступеневу очистку: через подвійний циклон, трубний та реберний охолоджувачі, а також через тирсу і пінополістироловий фільтр для видалення твердих частинок та смол. Після очищення газ змішували з повітрям у трубі Вентурі та подавали для живлення двигуна потужністю 30 кВт (рис. 2.8).

Окремо газифікатор потужністю 10 кВт випробовували з різними видами біомаси, які попередньо піддавали обробці: подрібнювали до однорідного розміру або брикетували. Такий підхід дозволяв забезпечити рівномірний процес газифікації та підвищити ефективність перетворення палива на газ із стабільним вмістом горючих компонентів. Результати показали часткову заміну дизельного палива в двигунах з запалюванням від стиснення (ЗС):

- акація золотиста – 70–76 %,
- деревна тріска – 62,25 %,
- паливна деревина – 22,5 %,
- стебла сорго – 58,6 %.

У іншому експерименті газифікатор потужністю 3,75 кВт використовувався для тамариндуса та качанів кукурудзи: виробничий газ замінив 62,27 % та 48–52 % дизельного палива відповідно (Jain, 1996).

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

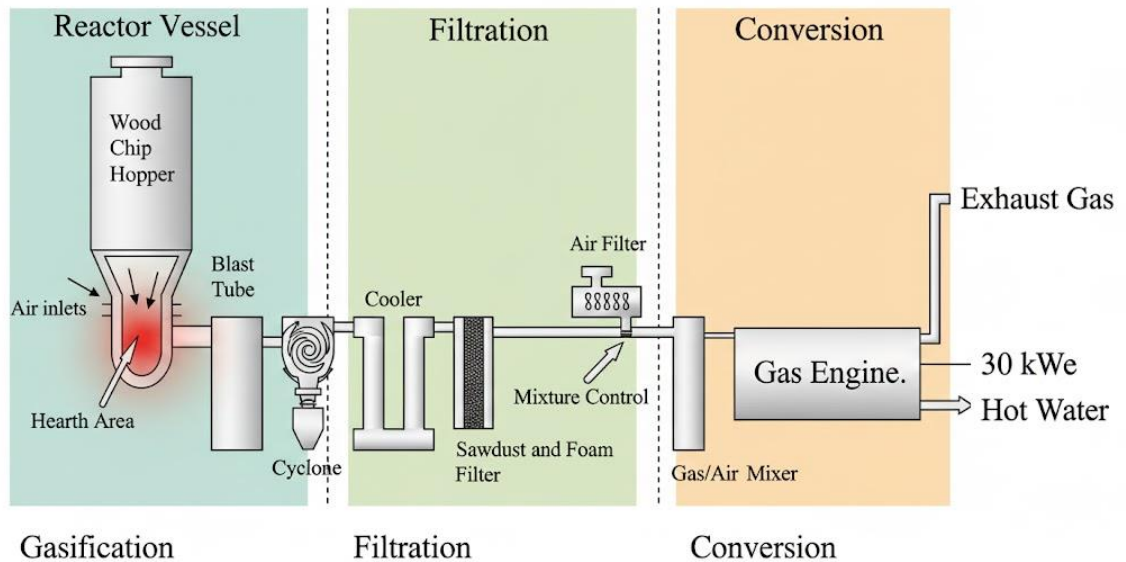


Рис. 2.8. Система газифікації з низхідним потоком для застосування двигуна

Ghosh et al. (2004) описали проєкт електрифікації п'яти сіл на островах Гошаба (Індія) за допомогою газифікаторів нижнього ходу потужністю 5×100 кВт. Кожен газифікатор оснащувався:

- системою охолодження газу з розпиленням води,
- двоступеневою системою очищення газу,
- повітрорудовкою,
- двигуном 165 к.с., з'єднаним з генератором змінного струму 125 кВА,
- насосними установками для циркуляції води та видалення золи.

Експлуатаційні показники:

- витрата дров – 0,822 кг/кВт·год,
- витрата дизельного палива – 0,135 л/кВт·год,
- заміщення дизеля промисловим газом – 59 %,
- загальний ККД установки – 19 %.

Leung et al. (2004) повідомили про використання газифікаторів нижнього ходу потужністю 60–200 кВт у Китаї для газифікації соломи для домашнього приготування їжі, з ефективністю 75 % і теплотою згоряння генераторного газу 3,8–4,6 МДж/м³.

2.3. Порівняння газогенераторів в киплячому шарі і шарових газогенераторів

У таблиці 2.4 представлено порівняльний аналіз балонних газогенераторів та установок із псевдозрідженим шаром. Порівняння ґрунтується на практичному досвіді експлуатації аналогічних установок у різних регіонах світу та враховує ключові технологічні параметри: продуктивність, склад виробленого газу, коефіцієнт перетворення палива та особливості використання сировини. У таблиці виділено переваги та обмеження кожного типу газогенератора, що дозволяє оцінити їх придатність для різних умов і видів палива.

Таблиця 2.4 (початок)

Порівняння шарового газогенератора та газогенератора киплячого шару

Шаровий газогенератор	Газогенератор киплячого шару
1. Технологія	
(-) Нерівномірний розподіл температури палива в шарі; (-) Виражені зони ендотермічних реакцій; (-) Ускладнений теплообмін; (-) Потенційна можливість плавлення золи (-) Час перебування палива в реакторі: від годин до днів;	+Температурний режим палива забезпечує рівномірний розподіл тепла по всьому об'єму газогенератора; +Теплові потоки рівномірно поширюються всередині реакторної зони; +Висока ефективність передачі тепла від стінок до палива; +Інтенсивне перемішування сприяє повному контакту між паливом та окислювачем; +Тривалість перебування палива у реакторі коливається від декількох секунд до кількох хвилин.

Таблица 2.4 (продовження)

2. Досвід експлуатації	
+Простота, надійність, можливість використання різних видів палива; + Однаковий тип процесу, що використовується для установок різної потужності;	+ Газові генератори можуть використовуватися в широкому діапазоні потужностей; + Надійність і безпека забезпечуються при використанні більшості видів палива;

Шаровий газогенератор	Газогенератор киплячого шару
3. Газогенератор	
- 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;	+ 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	
(-) 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;	(-) 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	
(+) конверсія вуглецю велика; (+) потрібна менша кількість окислювача;	(+) конверсія вуглецю велика;

6. Необхідна швидкість дуття	
(+) не потрібна висока швидкість дуття;	(-) необхідна висока швидкість дуття для забезпечення киплячого шару;

7. Інвестиції	
-Інвестиції є важливими, і чим вища потужність, тим більші інвестиції.	(+) інвестиції не великі

2.4. Охолодження і очистка газу [3]

На виході з газогенератора отриманий газ має високу температуру та містить різні шкідливі домішки: золу, шлак, вугілляний пил, сажу, смолу, сульфідні сполуки та воду.

Гарячі гази зазвичай не підходять для безпосередньої подачі в двигун, оскільки їхня низька щільність зменшує теплову ємність, що призводить до зниження вихідної потужності двигуна.

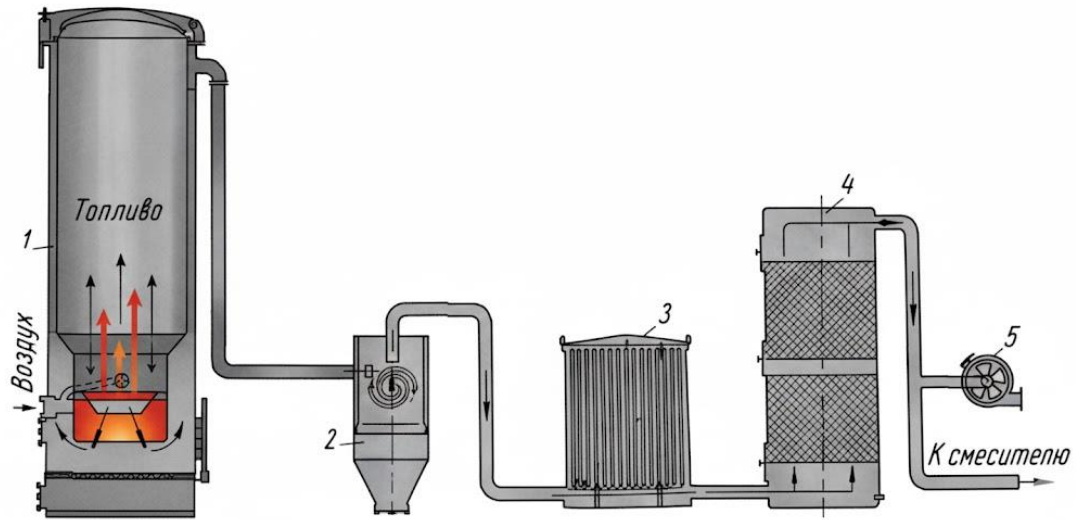
Механічні частинки та смола, потрапляючи в систему впуску та циліндри, ускладнюють нормальну роботу двигуна, сприяють забрудненню мастила та прискорюють знос тертьових деталей. Тому перед подачею в двигун газ необхідно охолодити та очистити від твердих домішок.

Охолодження газу

У газогенераторах поперечного або прямого типу газифікації, що працюють на деревній біомасі чи антрацитовому вугіллі, температура вихідного газу під час стаціонарного режиму зазвичай коливається в межах 450–600 °С. Проте під час транспортування газу, наприклад у процесі руху транспортного засобу, його температура знижується до 250–300 °С через охолоджувальний ефект, який виникає внаслідок обдування корпусу генератора потоком повітря.

Таке падіння температури безпосередньо впливає на теплотворну здатність та склад газу, що виробляється, і ці фактори необхідно враховувати при регулюванні режиму роботи газогенератора для забезпечення стабільної роботи двигуна чи котельної установки.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



**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, де передбачено повне прогрівання камери та верхній відбір газу, спостерігається більш інтенсивне охолодження газу всередині установки. Температура на виході зазвичай не перевищує 120–180 °С, що, проте, все ще є достатньо високою для ефективного формування газоповітряної суміші.

Для досягнення максимальної щільності суміші газ необхідно охолодити до рівня навколишнього середовища. У реальних умовах, коли зовнішнє повітря має температуру близько 15 °С, газ вдається охолодити лише до 30–40 °С. Подальше зниження температури потребує значного збільшення площі теплообміну, що наразі є технічно складним для мобільних транспортних газогенераторів через обмежені габарити та невелику масу установки.

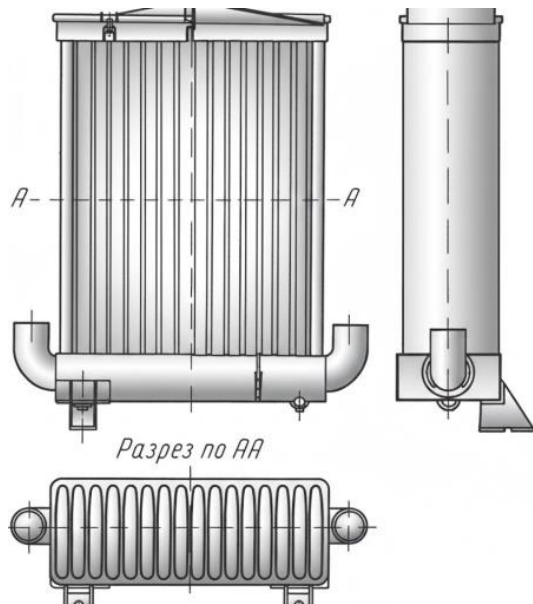


Рис.2.10. Охолоджувач газу радіаторного типу газогенераторної установки НАМИ-Г-78

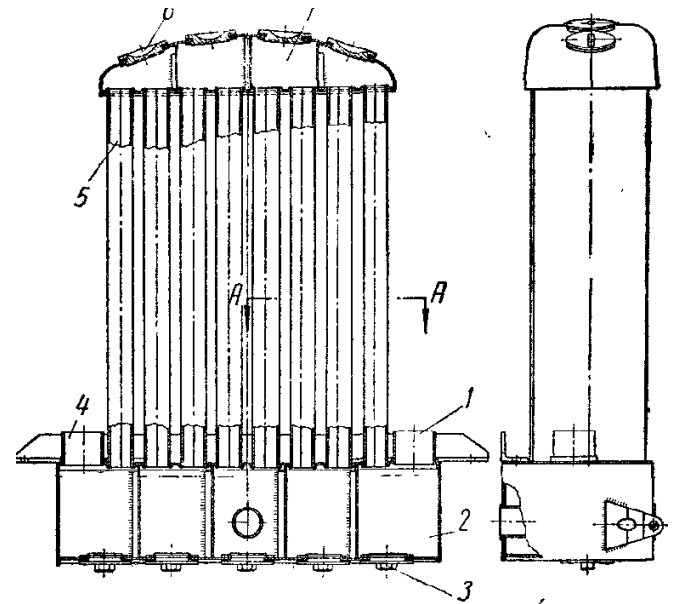


Рис.2.11. Охолоджувач газу радіаторного типу газогенераторної установки УралЗІС-2Г

Охолодження газів після виходу з газогенератора може виконуватися двома основними способами: через довгий трубопровід, що веде до скрубера, або через спеціальні радіаторні охолоджувачі, розташовані перед водяним радіатором транспортного засобу, як, наприклад, у газогенераторній установці УралЗІС-2Г (рис. 2.9).

Восьмиходовий охолоджувач установки НАМИГ-78 (рис. 2.10) складається з верхнього та нижнього резервуарів і восьми труб еліптичного перерізу. Газ надходить у лівий відсік нижнього резервуара через патрубок 1, послідовно проходить усі вісім вертикальних труб 5, повертається на 180° через нижній резервуар 2 і верхній резервуар 7 та виводиться через патрубок 4. Верхній резервуар обладнаний чотирма контрольно-пробковими отворами 6, а нижній – п'ятьма пробками 3 для перевірки стану та очищення рідини. Дрібні отвори на зовнішній стороні нижнього бака дозволяють зливати конденсат. Велика кількість пробок у такому радіаторі ускладнює експлуатацію та подовжує час обслуговування.

Більш зручним варіантом є чотирьохходовий радіаторний охолоджувач УралЗІС-2Г (рис. 2.11), що складається з 16 вертикально розташованих труб.

									Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

Верхня кришка бака накриває весь ряд труб, що дозволяє швидко перевірити та промити внутрішню частину апарату. Нижній резервуар має три пробки – одну спереду та дві знизу – для зливу води під час очищення. Конденсат відводиться через отвори пробок. Для монтажу на шасі автомобіля передбачено два приварені кронштейни на передньому нижньому бачку.

Зазвичай процес охолодження газу поєднується з його механічним очищенням. Кожен очищувач частково виконує функцію охолоджувача, і навпаки – охолоджувач сприяє певному рівню очищення. Тому агрегати системи обробки газу зазвичай комбіновані, хоча їх назва залежить від основної функції – або «очисник», або «охолоджувач».

Газ охолоджується шляхом розширення і теплопередачі до стінок апарату. Під час цього процесу частково конденсується водяна пара, яка ефективно видаляє дрібні частинки попелу та вугільного пилу, а також частину залишкової смоли. Однак остаточне очищення від смоли має забезпечуватися ще в газогенераторі шляхом правильного підбору параметрів та конфігурації камери газифікації. Газ, що виходить із генератора, повинен містити не більше 0,5 г смоли на 1 м³ сухого газу, щоб уникнути засмічення трубопроводів та подальших апаратів системи.

Механічні домішки в газі

У сучасних транспортних газогенераторних установках середній вміст пилу в газі зазвичай коливається в межах 2–3,5 г/м³. Однак ця величина значною мірою залежить від робочого навантаження, виду та стану палива. На рис. 2.12 показано зміну концентрації пилу в газі при різних положеннях розвантажувального пристрою ГАЗ-42, що працює на дерев'яних клинах.

При використанні м'якої деревної тріски або вугілля з високим вмістом дрібнодисперсного пилу його концентрація може досягати 7–8 г/м³ газу. Подібна ситуація спостерігається при роботі з тріскою м'яких порід або великим вмістом дрібнозернистого вугілля – рівень пилу також зростає до 7–8 г/м³.

У стаціонарних установках, що забезпечують постійну подачу газу в двигун, максимальний вміст пилу зазвичай не перевищує 0,02–0,03 г/м³, що значно подовжує термін служби двигуна. Для транспортних газогенераторів обмеженого

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

розміру, наприклад автомобільних установок, концентрація пилу може сягати $0,15 \text{ г/м}^3$, що прискорює знос двигуна порівняно з роботою на бензині.

Пил газу складається з суміші дрібних частинок вугілля, сажі, золи та дисперсного шлаку. Частинки поділяються на грубі та дрібні за розміром. Грубий пил ($>60 \text{ мкм}$) осідає у спокійному повітрі зі зростаючою швидкістю. Дрібний пил до 60 мкм осідає приблизно з постійною швидкістю, тоді як частинки менше 20 мкм залишаються довго підвішеними в газовій фазі. Такі дрібні частинки суттєво ускладнюють очищення газу та підвищують ризик зносу двигунів і обладнання. Тому в транспортних установках застосовують багатоступінчасті системи фільтрації та охолодження газу для зниження пиловмісту.

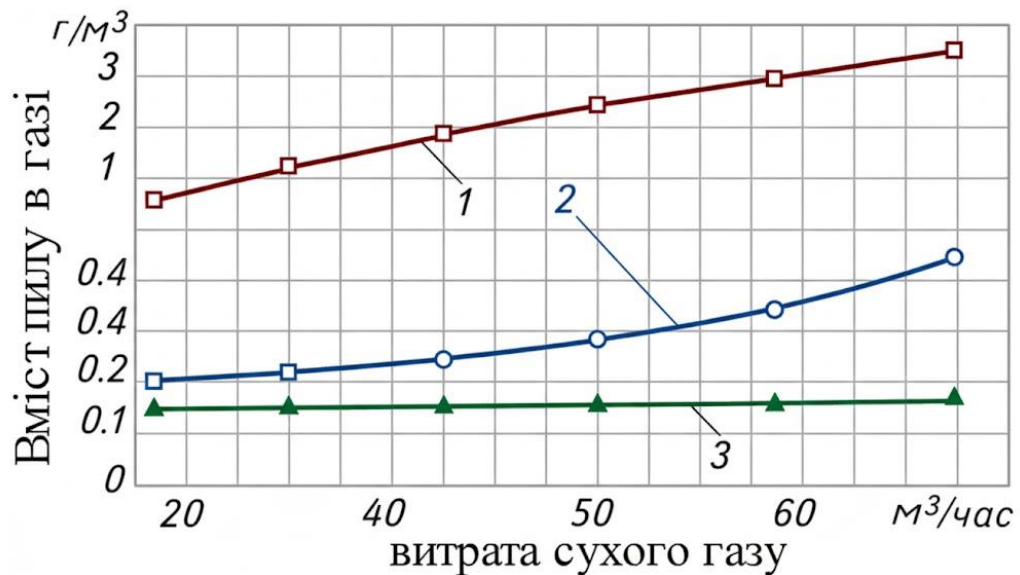


Рис.2.12. Вміст пилу в газі в різних місцях газогенераторної установки ГАЗ-42 в залежності від продуктивності газогенератора з дослідів інж. Коренєва в НАТІ:

**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.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

мокрих фільтрів, скрубєрів або комбінованих систем охолодження й очищення газу. Такий підхід забезпечує більш стабільну роботу двигунів і підтримує чистоту газової магістралі перед змішувачем та споживачами газу.

Грубе очищення газу

Інерційні очисники застосовуються для видалення великих частинок пилу з газу, використовуючи властивості інерції твердих тіл. Найпоширенішим пристроєм такого типу є циклон. Газ надходить у циклон через сопло, розташоване під певним кутом відносно корпусу, і набуває обертального руху. Під дією відцентрової сили важчі частинки пилу відкидаються до стінок, втрачають швидкість і осідають у пиловловлювачі. Спеціальні відбивачі запобігають поверненню пилу в потік газу, а очищений газ виходить через верхній патрубок. Осілий пил видаляється через кришку вниз.

Для зменшення теплових втрат та запобігання конденсації водяної пари стінки циклону у робочій зоні виконуються подвійними, що запобігає налипанню вугільного пилу та забезпечує стабільну роботу. Тому циклони зазвичай встановлюють безпосередньо після газогенератора, коли газ ще має високу температуру.

Більш складні конструкції циклону включають зварний циліндричний корпус із робочою камерою та верхньою частиною у вигляді спіралі навколо вихідного патрубка. Тангентальний вхідний патрубок забезпечує оптимальний обертальний рух газу. У нижній частині корпусу приварений конус, що спрямовує осілий пил до пиловловлювача та запобігає його поверненню в основний потік. Кришка з різьбовим доступом дозволяє легко очищати накопичений пил.

Циклони компактні й здатні забезпечувати ступінь очищення газу до 90–95%. Проте при зниженні швидкості газу ефективність падає, оскільки відцентрова сила, яка утримує частинки на стінках, зменшується. У багатьох автомобільних газогенераторних установках застосовують комбіновані системи інерційного очищення та охолодження газу, що одночасно знижують його температуру та видаляють механічні домішки, підвищуючи якість генераторного газу для роботи двигуна.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

стінками пластин. В результаті пил осідає або накопичується у нижній частині корпусу.

На рис.2.14 показано конструкцію грубого батарейного скрубера-охолоджувача, що складається з трьох послідовно з'єднаних прямокутних секцій. Кожна секція обладнана тарілкою з численними дрібними отворами, що забезпечує багатоступеневе очищення газу і підвищує ефективність видалення пилу та конденсованої смоли.

Такі скрубери широко застосовують у комбінованих системах очищення та охолодження газу для транспортних газогенераторних установок, зокрема на автомобілях ГАЗ-42 і ЗІС-21А. Вони одночасно знижують температуру газу та очищають його від твердих домішок, що сприяє стабільній роботі двигуна та зменшує знос його деталей.

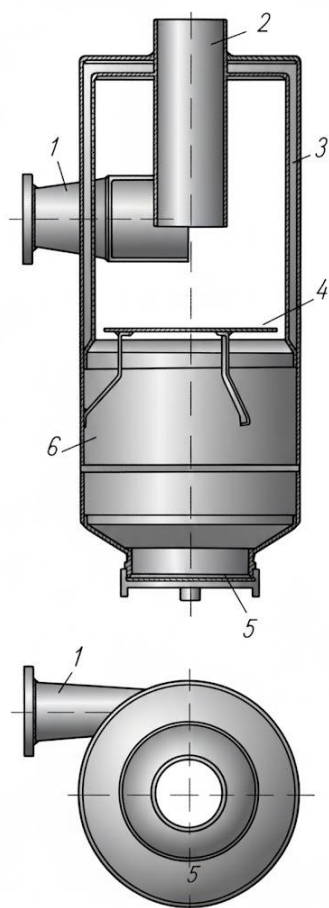


Рис.2.15 Очищувач типу циклон газогенераторної установки НАТИ-Г-78

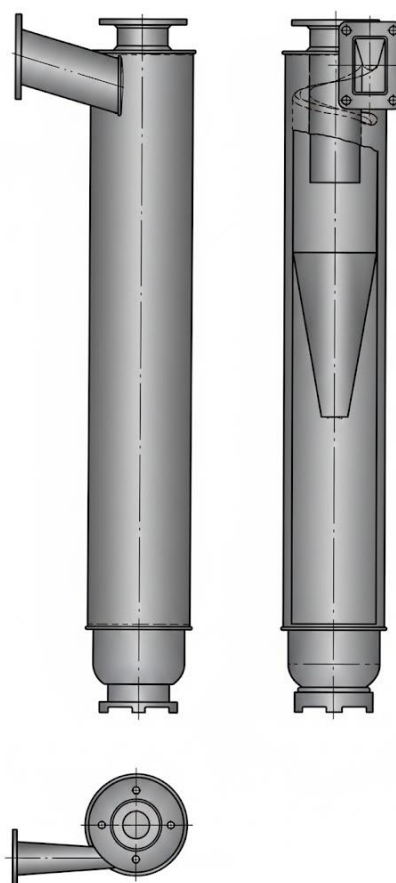


Рис.2.16 Очищувач типу циклон газогенераторної установки УралЗІС-352

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

00.КМР.144.003.002.ПЗ.

Аркуш

Цей тип газифікатора також називають газифікатором з відкритим верхом або стратифікованим безперезимним. Верхня зона апарату працює під атмосферним тиском, а вертикальні стінки судини виключають надмірне стиснення газового потоку. Завдяки цьому біомаса вільно переміщується вниз по реактору під дією власної ваги.

Існує варіант із відкритим ядром, який також є безперезимним. У такій конструкції повітря не подається через центральну частину, як у традиційних газифікаторах нижнього ходу, а засмоктується зверху завдяки всмоктуючому ефекту, створеному потоком газу в нижній зоні. Такі газифікатори оптимальні для переробки дрібної та легкої біомаси, наприклад, рисового лушпиння або соломи. Процес газифікації в таких газогенераторах можна умовно розділити на чотири функціональні зони:

Зона I (найвища) приймає сире паливо зверху. Тут відбувається його сушіння завдяки проходженню повітря і теплопередачі від нижчої зони (зони II). У міру руху вниз біомаса нагрівається, і при температурі вище 350 °C вона піддається піролізу, розкладаючись на кокс, неконденсовані гази (CO, H₂, CH₄, CO₂, H₂O) та пари смол, які можуть конденсуватися.

Зона II отримує тепло від зони III переважно через теплопровідність. Тут піролітичні гази контактують з обмеженою кількістю повітря та частково згоряють у так званому палаючому піролізі, що забезпечує додаткову теплову енергію для підтримки процесу.

Зона III містить піролітичний кокс і золу, що утворилися в попередній зоні. У цій зоні відбувається ендотермічна газифікація: гарячі гази, насичені CO₂ та H₂O, реагують із коксом за реакціями:



Це формує основний генераторний газ, що містить H₂ і CO. Температура газу знижується через ендотермічні реакції, але зазвичай залишається вище 700 °C. У цій зоні формується більшість коксу та смол, які згодом забезпечують тепло для піролізу верхніх шарів.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Неузгодженість потоків становить 0,09 % і пояснюється округленням величин

Енергетичні характеристики

Теплота згоряння синтез-газу, МДж/м³

$$Q_i^r = 12.706 \times \frac{CO}{100} + 10.760 \times \frac{H2}{100} + 35.808 \times \frac{CH4}{100}$$
$$Q_i^r = 12.706 \times \frac{19.0}{100} + 10.760 \times \frac{18.1}{100} + 35.808 \times \frac{0.40}{100} = 4.505$$

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

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

Витратні характеристики

За початковими даними номінальна теплова потужність газогенератора становить

$$P = 50 \text{ кВт} = 180 \frac{\text{МДж}}{\text{год}}$$

Витрата генераторного газу, м³/год, становить

$$V_g = P/Q_i^r = 180 \frac{\text{МДж}}{\text{год}} / 4.505 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3} = 39,95 \text{ м}^3/\text{год}$$

Питома швидкість виходу сухого генераторного газу буде

$$s_{dsg} = \frac{V_g/S}{3600} = \frac{39.95/0.34}{3600} = 0.033 \text{ м/с}$$

Енергетична витрата біомаси P_b розраховується як

$$P_b = P/Eta = 0.18/0.761 = 0.2365 \text{ ГДж/год}$$

Витрата деревної біомаси, кг/год, становитиме

$$V_p = P_b/LHV = 0.2365 \frac{\text{ГДж}}{\text{год}} / 0.01239 \frac{\text{ГДж}}{\text{кг}} = 19.08 \text{ кг/год}$$

										Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

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

$$S = B_p/q = 19.08/210 = 0.091 \text{ м}^2$$

Внутрішній діаметр газогенератора буде:

$$D = \sqrt{4 \cdot S/\pi} = \sqrt{4 \cdot 0.091/3.1416} = 0.34 \text{ м}$$

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

$$v_b = \frac{B_p/(\rho_b \cdot S)}{60} = \frac{19.08/(200 \cdot 0.091)}{60} = 0.0175 \text{ м/хв} = 1.02 \text{ м/год}$$

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

$$\tau = H_{gg}/v_b = 2.0/0.0175 = 114.28 \text{ хв} = 1.90 \text{ год}$$

3.3. Розрахунок системи охолодження і очистки газу

Поверхня охолоджувача

$$F_{ох} := 0.05 \cdot \text{м}^2 \cdot \left(\frac{Q_{ГГ}}{\text{кВт}} \cdot 1.36 \right) F_{ох} = 3.4 \text{ м}^2$$

Для 2-х трубних охолоджувачів з трубами діаметром

$$D_{тр} := 20 \text{ мм}$$

довжина кожної труби становитиме

$$l_{ох} = \frac{F_{ох}/2}{20 \cdot \pi \cdot D_{тр}} ; l_{ох} = 1.35 \text{ м}$$

Допустима швидкість газу в очищувачі

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_{оч} := 0.5 \cdot \frac{м}{с}$$

$$V_{Г} = \frac{Bg}{3600} = \frac{39.95}{3600} = 0.011 \text{ м}^3/с$$

Діаметр очищувача

$$D_{оч} := \sqrt{\frac{4 \cdot V_{Г}}{\pi \cdot v_{оч}}} = 0.167 \text{ м}$$

Dоч = 167 мм; Doch = 200 мм

Об'єм насадочних кілець при двох шарах висотою

$$h_{нк} := 400 \cdot \text{мм}$$

кожний

$$V_{кіл} := \frac{\pi \cdot D_{оч}^2}{4} \cdot 2 \cdot h_{нк} \quad V_{кіл} = \frac{(\pi \cdot D_{оч})^2}{4} \cdot 2 \cdot 0.4 = 0.018 \text{ м}^3$$

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі проведено аналіз потенціалу використання біомаси для генерації енергії за допомогою газогенераторів.

Досліджувана тема є актуальною та перспективною, особливо в контексті енергетичної диверсифікації України та впровадження джерел енергії з низьким або нейтральним викидом CO₂.

Залишки біомаси, зокрема соняшникову лузгу, можуть ефективно застосовуватися як первинне паливо в газогенераторах, де відбувається її перетворення у вторинне паливо, придатне для виробництва теплової та електричної енергії.

У роботі наведено розрахунки та технічні параметри газогенератора нижнього ходу потужністю 50 кВт, що працює на соняшникових пелетах. Розрахунки враховують ефективність газифікації, склад продуктового газу, теплові втрати та можливості використання генераторного газу для подальшого виробництва енергії на локальному рівні.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетухи. — Київ: Академперіодика, 2022. — 373 с.
2. Алєшина А. С., Сергєєв 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 виконання випускної кваліфікаційної роботи [Електронний ресурс] на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спец. 144 «Теплоенергетика», освіт.-проф. прогн. «Теплоенергетика та енергоефективні технології» ден. та заоч. форми навчання / 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.

					00.KMP.144.003.002.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		