

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

МАКАРЧУК МИКОЛА ПЕТРОВИЧ

УДК 631.5

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Макарчук М.П.

Керівник роботи

Міненко С.В.

к.т.н., доцент

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Макарчук Микола Петрович. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів газогенераторної установки. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В кваліфікаційній роботі розроблено конструктивно-технологічна схема газогенераторної установки, що включає в себе газогенератор з параметричним регулювання процесу газифікації в площині фурменного пояса, систему очищення та охолодження генераторного газу, систему параметричного управління подачею окислювача в реакційну зону газогенератора, споживача генераторного газу.

Отримано залежність для розрахунку швидкості витікання повітря з дутьової фурми, що враховує як варіативність витрати повітря, так і теплообміну між генераторним газом та повітрям, обумовлених режимами функціонування повітряного електромагнітного клапана управління.

Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів дозволила визначити, що застосування динамічного асинхронного режиму керування газогенератором дозволяє адаптувати газогенераторну установку до роботи на різних видах твердого палива та налаштувати різні витрати генераторного газу споживачем.

Порівняльний аналіз функціонування ДВЗ електростанцій і теплогенератора на традиційних видах палив, та генераторному газі виробленому в розробленій газогенераторній установці, з сільськогосподарських та промислових відходів, показує суттєве зниження матеріальних витрат на паливо.

Ключові слова: газогенераторна установка, газ, паливо, очищення, охолодження.

ANNOTATION

Makarchuk Mykola Petrovych. Optimization of design and technological parameters of a gas generating unit. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2023.

In the qualification work, a structural and technological scheme of a gas generator unit was developed, which includes a gas generator with parametric control of the gasification process in the plane of the tuyere belt, a system for cleaning and cooling the generator gas, a system for parametric control of the oxidizer supply to the reaction zone of the gas generator, and a consumer of generator gas.

A dependence for calculating the air outflow rate from the blower belt was obtained, which takes into account both the variability of air flow and heat exchange between the generator gas and air due to the modes of operation of the air electromagnetic control valve.

The optimization of design and technological parameters made it possible to determine that the use of a dynamic asynchronous control mode of the gas generator makes it possible to adapt the gas generator unit to operate on different types of solid fuels and to adjust different generator gas consumption by the consumer.

A comparative analysis of the functioning of internal combustion engines of power plants and a heat generator using traditional fuels and generator gas produced in the developed gas generator unit from agricultural and industrial waste shows a significant reduction in material costs for fuel.

Keywords: gas generator unit, gas, fuel, purification, cooling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДХОДІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРІВ І СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ НИМИ.....	9
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ КЕРУВАННЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	20
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РІЗНИХ ОБСЯГІВ ВИТРАТИ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ.....	29
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ВСТУП

Актуальність дослідження. Агропромисловий сектор економіки є відхідною галуззю. Відходи виробляються різних етапах створення основного сільськогосподарського продукту. Вихід основного продукту іноді становить 15...30 % від вихідної сировини. Залучення до виробничих циклів технологічних відходів, їх енергетична переробка забезпечує зниження витрат виробництва на одиницю кінцевої продукції за тих самих витрат за сировину [9]. Найбільша частина відходів посідає галузь тваринництва (56 %), друге місце посідають відходи рослинництва (35,6 %). Для порівняння, частку переробних галузей припадає близько 4,7 % відходів [11].

Основну частку у відходах тваринництва займають продукти життєдіяльності тварин, яких належить і гній. Відповідно до класифікаційного каталогу відходів, гній класифікується наступним чином: гній ВРХ перепрілий (зберігання не менше шести місяців) – V клас небезпеки; гній ВРХ новий - IV клас загрози; гній від свиней свіжий – III клас небезпеки; гній від свиней перепрілий (зберігання не менше одного року) - IV клас небезпеки. Пташиний послід розглядається як токсичні відходи виробництва III класу небезпеки. Відходи рослинництва рідко перевищують V клас небезпеки [10].

У гною сільськогосподарських тварин містяться мікроелементи, а також речовини та елементи, що викликають корозію машин та обладнання (вуглекислота, аміак, сульфати та сульфіді, хлориди, кальцій, магній та ін.). Гній, крім живильних елементів, також містить велику кількість патогенних мікроорганізмів, личинок та яєць гельмінтів, які є джерелами різноманітних захворювань. Це своє чергу породжує епідемічну небезпеку, що залежить лише від наявності патогенних мікроорганізмів та його концентрації, а й від термінів їх виживання. Крім того, у гною міститься велика кількість насіння бур'янів, які завдають значної економічної шкоди при виробництві продукції рослинництва [3]. Таким чином, з одного боку, гній є цінним органічним добривом, а з іншого

– безпосереднє його використання без попередньої підготовки становить серйозну екологічну небезпеку для довкілля, тварин та людей.

Залежно від виду та способу утримання сільськогосподарських тварин, а також наявних у системі машин та обладнання, гній та побічні продукти рослинництва (відходи) у господарствах піддають частковій або глибокій переробці. Ці заходи забезпечують як знезараження від патогенної мікрофлори і насіння бур'янів, а й за системному підході дозволяють витягувати додаткові енергетичні ресурси [8].

Проблема утилізації сільськогосподарських відходів нині стоїть досить гостро у світлі підвищення енергетичної ефективності виробництва та посилення вимог екологічного законодавства. Для її рішення фахівці розробляють та досліджують кілька стратегічних напрямків. Ключовими з них є: - зниження кількості відходів на одиницю основного сільськогосподарського продукту за рахунок впровадження сучасних технологій і системи машин, а також - рециклінг відходів. Відходи є невід'ємною частиною технологічного виробництва основного сільськогосподарського продукту. Наприклад, солома під час виробництва зернових культур або гній тварин під час виробництва молока та м'яса.

Через специфіку сільськогосподарського виробництва (використання в технологічних процесах тварин і рослин) будь-яка технологія апріорі не може бути безвідходною. Зниження кількості відходів при виробництві також має свою межу, до якої сучасні виробники, що використовують традиційні технології виробництва, вже наблизилися впритул. Внаслідок цього, практичний інтерес становлять енергетичні технології з переробки відходів, у яких виробляється як енергія, і нові комерційні продукти (наприклад - органічні чи мінеральні добрива).

Як у розвинених, так і країнах, що розвиваються, практичний інтерес до альтернативних технологій виробництва енергоресурсів, з використанням місцевих відновлюваних джерел енергії, виникає з завидною сталістю. Мотиви

спонукання різні: від боротьби за екологічні ідеали до соціально-політичних, але зрештою всі інновації приводяться до спільного знаменника - економічного. Наскільки доступнішими, надійнішими, ефективнішими і т.д. нова технологія буде по відношенню до традиційної.

З урахуванням вищевикладеного, тема кваліфікаційної роботи є актуальною та присвячена питанням удосконалення технології переробки відходів сільськогосподарського та промислових виробництв, побічними продуктами якої є: теплова енергія, горючі гази (генераторний газ) та концентроване мінеральне добриво (зола).

Мета роботи – підвищення енергоефективності використання відходів сільського господарства та промисловості у технологічних циклах виробництва шляхом оптимізації конструктивно-технологічних параметрів газогенераторної установки.

Для реалізації поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри газогенераторної установки з параметричним регулюванням подачі окислювача (повітря) у реакційну зону газогенератора;
- вдосконалити конструкцію газогенераторної установки, підвищити її універсальність та адаптивність за видами твердого палива.

Об'єкт дослідження: газогенераторна установка із параметричним регулюванням робочих параметрів, двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ), теплогенератор.

Предмет дослідження: конструкція та режими функціонування газогенераторної установки при виробництві електричної та теплової енергії на відходах сільськогосподарських та промислових виробництв.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Міненко С. В., Макарчук М. П. Огляд конструкцій газогенераторів і способів керування ними. *Наукові читання–2023: матеріали науково-*

практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. Т. 3. С. 74-77.

2. Міненко С. В., **Макарчук М. П.** Розробка конструктивно-технологічної схеми газогенераторної установки. *Збірник матеріалів ІХ Міжнародної науково-практичної конференції „Інноваційні технології в АПК”.* 7-8 червня 2023 року, м. Луцьк. С.

Практичне значення одержаних результатів. Практичний інтерес для підприємств АПК представляє розроблена газогенераторна установка з можливістю параметричного регулювання робочих параметрів у площині фурменного поясу.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 17 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 51 сторінка комп'ютерного тексту, містить 31 рисунок.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДХОДІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРІВ І СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ НИМИ

Сільськогосподарські та промислові відходи можна не просто утилізувати, а здійснювати їхню енергетичну переробку з використанням газогенераторних технологій. Що дозволяє не тільки екологічно позбавлятися відходів, а й отримувати нові комерційні продукти з високою доданою вартістю, такі як теплова енергія, газоподібне паливо для теплогенераторів та ДВЗ, електрична енергія, концентроване мінеральне добриво (зола).

Використання місцевих та альтернативних джерел енергозабезпечення у сільськогосподарських циклах виробництва сприятиме не лише зниженню витрат виробництва, а й вирішує цілий комплекс завдань щодо підтримки енергетичного та хіміко-біологічного балансу в одному з ключових засобів сільськогосподарського виробництва – земельних фондах.

До основних характеристик відходів, що мають ключовий вплив на процес їх енергетичної переробки, можна віднести такі, як: вологість, насипна вага (щільність), зольність, розмірність. Для отримання вихідної інформації щодо основних споживчих характеристик сільськогосподарських відходів та біопалива, проведено дослідження у державній бюджетній установі. Частина показників матеріалів використаних у досліджах визначено самостійно за типовими методиками.

Використання біопалива як виду енергоресурсів не так широко поширене, на відміну від традиційних видів палива. Тим не менш, у зв'язку з тим, що в нашій країні розвинена лісова та деревообробна промисловість та великі території зайняті вирощуванням сільськогосподарських культур, на цей вид енергетики звертається все більше уваги. Роботи в цьому напрямку представлені експериментальними та пілотними проектами. Здійснюються, як правило, в

ініціативному порядку сільськогосподарськими та промисловими підприємствами.

Сільськогосподарські відходи та біопаливо перед використанням у газогенераторній установці вимагають попередньої підготовки, оскільки містять значну кількість води (у деяких видах цей показник сягає 85 %). Видалення надлишкової води можливо здійснити за рахунок сушіння гарячими вихлопними газами ДВС, теплим повітрям від системи охолодження ДВС та генераторного газу через шар палива, що готується.

Побічним продуктом термічної переробки сільськогосподарських відходів є концентроване мінеральне добриво - зола, кількість якої в залежності від виду палива, що йде на газифікацію, варіює від 2,2 до 33%.

Різновиди палив для газогенератора наведені на рис. 1.1 -1.16



Рис. 1.1. Торф перехідний



Рис. 1.2. Торф низовий



Рис. 1.3. Тріска деревна (соснова)



Рис. 1.4. Дров'яні «кубики» (береза)



Рис. 1.5 - Тирса середня (соснова)



Рис. 1.6. Вугілля деревне



Рис. 1.7. Гній коровей



Рис. 1.8. Гній кінський



Рис. 1.9. Гній ВРХ безпідстильний, зневоднений на пресі



Рис. 1.10. Солома ячмінна



Рис. 1.11. Пелети паливні (із соснової тирси)



Рис. 1.12. Брикет паливний (із соснової тирси)



Рис. 1.13. Брикет паливний (із соснової тирси та безпідстилкового гною ВРХ)



Рис. 1.14. Брикет паливний (з безпідстилкового гною ВРХ)



Рис. 1.15. Брикет паливний, $d = 60$ мм (з безпідстилкового гною ВРХ)



Рис. 1.16. Брикет паливний, $d = 120$ мм (з безпідстилкового гною ВРХ)

Паливо для газогенератора має різну фізико-механічну структуру, гранулометричний склад та адгезивні характеристики. Внаслідок чого, режими функціонування газогенератора і як наслідок, параметри генераторного газу, що виробляється, також буде змінюватися.

Для ефективної переробки різних видів палива (сільськогосподарських відходів) в газогенераторній установці необхідно провести заходи щодо їх попередньої підготовки перед використанням (подрібнення та видалення вологи), а також здійснювати управління процесом газифікації.

Газогенератор – апарат (пристрій) для термічного перероблення твердих або рідких палив на горючі газу, що здійснюється в присутності окиснювача: повітря, вільного або зв'язаного кисню, водяної пари, їхніх сумішей тощо. Окислення (горіння) твердого палива в газогенераторі, на відміну від будь-якої топки, відбувається у великому шарі й характеризується обмеженим надходженням окислювача, недостатнього для повного спалювання палива. Процес, що відбувається в газогенераторі, називається газифікацією палива.

Газифікація - перетворення органічної частини твердого або рідкого палива на горючі газу під час високотемпературного (1000-2000 °C) нагрівання з окислювачем.

Газогенераторна установка - комплекс взаємопов'язаного обладнання для термічного перероблення твердих або рідких палив у горючі газу. Складається з: газогенератора, газопроводів, пристроїв для очищення та охолодження генераторного газу, систем управління та контролю. У деяких випадках комплектується споживачем генераторного газу, в якості якого виступає ДВЗ або теплогенератор.

Питання доступності та собівартості енергетичних ресурсів для кінцевого споживача є критичним фактором, що визначає фінансову стабільність технологічних виробничих циклів і підприємства в цілому. Проведений літературний огляд та аналіз міжнародних патентних баз даних за напрямом енергетичних технологій переробки відходів та енергетичного використання

місцевих біоресурсів засвідчили, що суттєвих, "революційних" технічних і технологічних змін у конструкціях газогенераторів із середини ХХ не відбулося. При цьому, спостерігається "еволюція" їхніх елементів і систем. Застосовуються сучасні конструкційні матеріали, використовується механізація та автоматизація приготування, завантаження і дозованої подачі палива, що йде на газифікацію, тощо. Слід зазначити, що однією з істотних інновацій у конструкції газогенератора стала система контролю з використанням промислового контролера, розроблена групою американських винахідників. Вона отримала практичну реалізацію в газогенераторних конструкторах Gasifier Experimenters Kit (the GEK). Також дослідження з газогенераторної тематики проводять в Індії, Китаї та в деяких країнах Європейського Союзу, серед яких є роботи не тільки узагальнювально-теоретичного, а й експериментального характеру. Наступним логічним кроком в еволюції газогенераторних установок має стати управління самим процесом газифікації твердого палива в газогенераторі.

Газогенераторні технології дають змогу виробляти з рослинної біомаси, відходів сільськогосподарських та індустріальних виробництв, що містять вуглець, газоподібне паливо, яке надалі може бути використане в технологічних процесах для отримання теплової енергії або як моторне паливо для ДВЗ (двигунів внутрішнього згорання). Процес газифікації, що протікає в газогенераторі за високих температур і контрольованої нестачі окислювача. Являє собою досить складний, багатофакторний хімічний процес руйнування і часткового окислення складних багатоконпонентних сполук, їхніх хімічних зв'язків. У результаті цього утворюються прості хімічні сполуки (CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , H_2O тощо) і виділяється деяка кількість теплової енергії, оскільки сумарний тепловий баланс процесу позитивний. Крім основного продукту газогенераторної технології (пального генераторного газу) і побічного - теплової енергії, що супроводжує процес його виробництва, кінцевим продуктом переробки рослинної біомаси та карбоновмісних відходів є концентроване мінеральне добриво – зола.

Газогенератори за способом організації процесу газотворення можна поділити на три основні типи: а) газогенератори прямого процесу газифікації; б) газогенератори оберненого (зворотного) процесу газифікації; в) газогенератори поперечного процесу газифікації. Також зустрічаються і комбінації елементів вищенаведених способів організації процесу газифікації в одному пристрої (наприклад, газогенератори двозонного процесу газифікації). На рис. 1...4 наведено схеми різних типів газогенераторів.

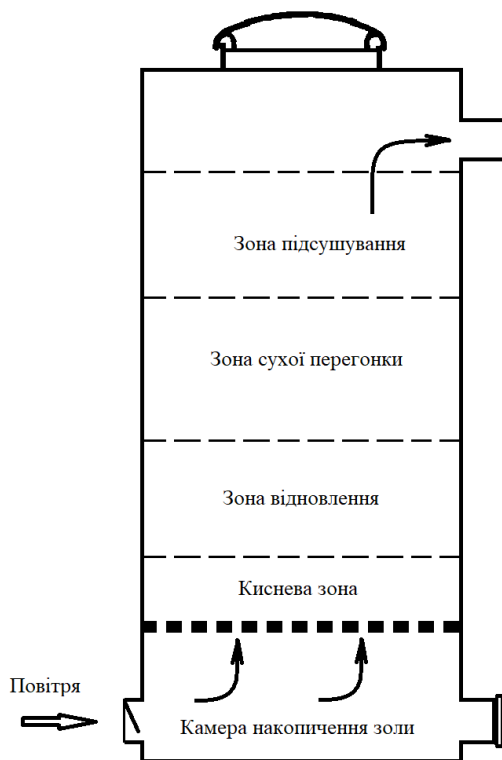


Рис. 1.17. Газогенератор прямого процесу газифікації

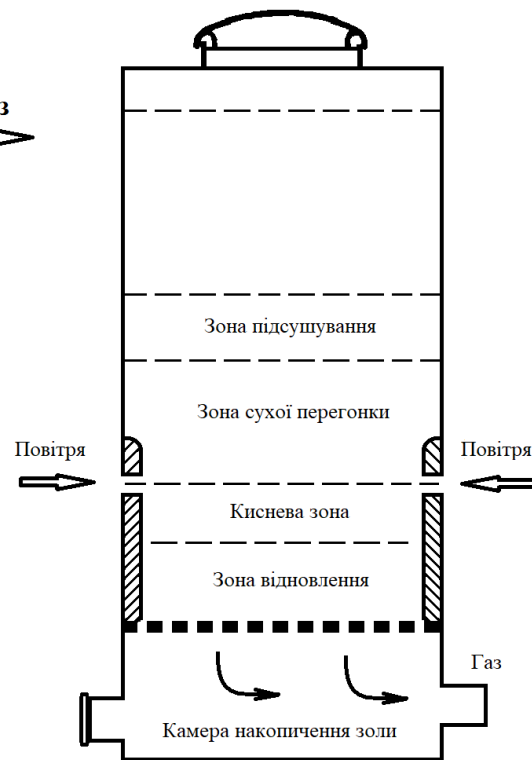


Рис. 1.18. Газогенератор зворотнього процесу газифікації

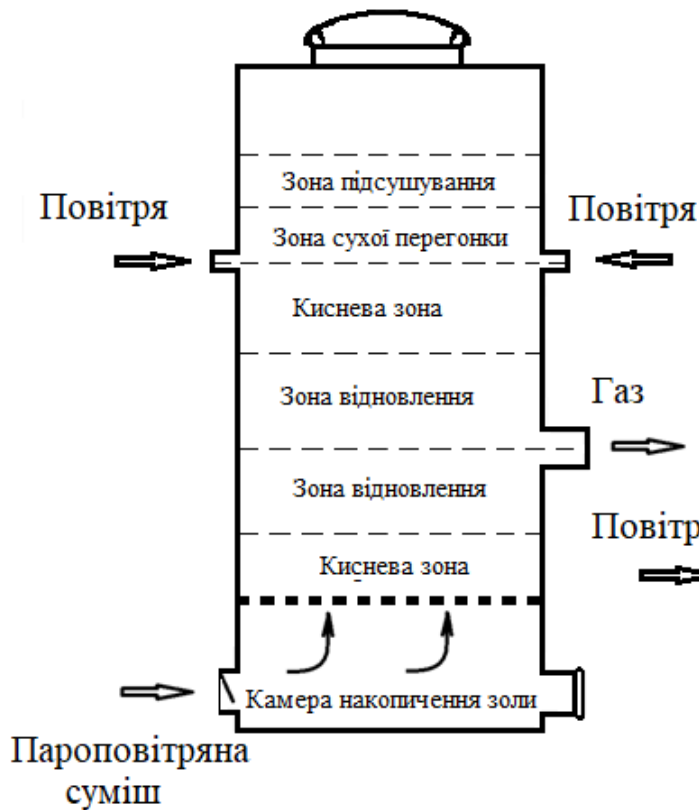


Рис. 1.19. Газогенератор двозонного процесу газифікації

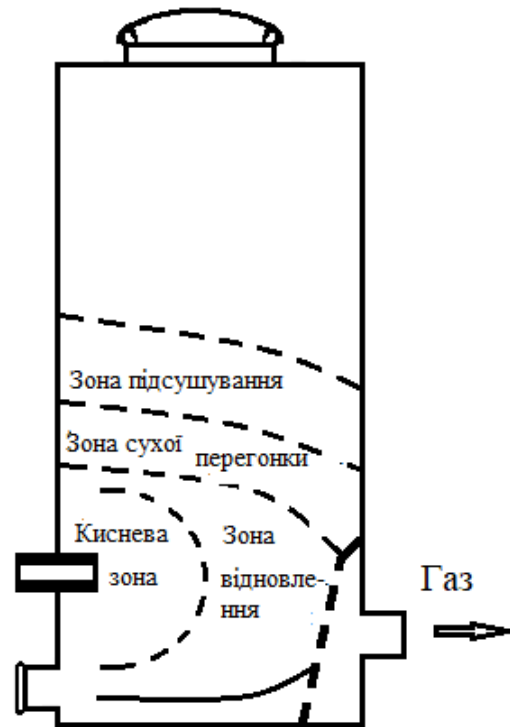


Рис. 1.20. Газогенератор поперечного процесу газифікації

У газогенераторах традиційних конструкцій (рис. 1.17 – 1.20) можливо організувати такі способи управління процесом газифікації:

- зміною конструктивно-технологічних параметрів газогенератора;
- зміною складу окислювача;
- зміною витрати генераторного газу.

До зміни конструктивно-технологічних параметрів газогенератора належить: зміна конструкції камери газифікації, зміна кількості та робочого діаметра дуттьових фурм, зміна типу процесу газоутворення (прямий або обернений). Цей метод дає змогу налаштувати газогенератор на певний режим функціонування. При цьому потрібне внесення істотних змін у конструкцію. Для оперативного (динамічного) управління газогенератором цей метод не придатний.

Зміна складу окислювача (атмосферне повітря, чистий або зв'язаний кисень, водяна пара, їхні суміші тощо), використовуваного в процесі газифікації,

дає змогу в динаміці регулювати температурний режим у камері газифікації та компонентний склад генераторного газу, який виробляє газогенератор. Використовується як елемент оперативного (динамічного) керування в деяких конструкціях промислових газогенераторів.

Зміна витрати споживання генераторного газу впливає на процес газифікації. Цей процес є наслідком зміни режиму функціонування споживача генераторного газу. При зменшенні витрати генераторного газу споживачем, його калорійність зменшується.

Висновки по розділу

Проведений літературний огляд і аналіз міжнародних патентних баз даних за напрямом енергетичних технологій переробки відходів та енергетичного використання місцевих біоресурсів вказують на відсутність у сучасних газогенераторних установок повноцінних систем управління процесом газифікації. Практично, газогенераторну установку і споживача генераторного газу розглядають як окремі керовані об'єкти, а не як сукупну взаємодіючу технологічну систему. Проектний розрахунок газогенераторної установки виконується з урахуванням виробництва максимального обсягу генераторного газу для споживача. На перехідних і неномінальних режимах функціонування газогенераторна установка виробляє генераторний газ гіршої якості (менш калорійний). Що своєю чергою негативно впливає на експлуатаційні характеристики споживача генераторного газу.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ КЕРУВАННЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Газогенераторні установки можна класифікувати за такими ознаками [12]:

- за способом організації процесу газоутворення у газогенераторі: прямого процесу газифікації; зворотного (зворотного) процесу газифікації; поперечного процесу газифікації Також зустрічаються і комбінації елементів наведених вище способів організації процесу газифікації в одному пристрої (наприклад, газогенератори двозонного процесу газифікації);

- за твердим паливом, що використовується при газифікації, окислювачу, в якості якого може застосовуватися: атмосферне повітря, чистий або зв'язаний кисень, водяна пара, їх суміші і т.д.;

- за наявності систем рекуперації (за їх наявності здійснюється підігрів окислювача за рахунок фізичного тепла виробленого генераторного газу);

- за критерієм мобільності: стаціонарні та пересувні;

- за режимом робочого тиску в газогенераторі, газогенераторні установки можна підрозділити на: газогенератори, що працюють під розрядженням ($-29,4 \div -9,8$ кПа); газогенератори, що працюють під низьким надлишковим тиском ($98 \div 294$ кПа) і газогенератори, що працюють під високим надлишковим тиском ($2451 \div 3922$ кПа);

- за способом видалення золи (шлаку) з газогенератора: у твердій або рідкій фазі;

- за видом і фракційним складом палива, що використовується для газифікації: «бітуміозні» (деревина, торф, солома, рослинні відходи), «худі» (антрацит, деревне вугілля), кускове, дрібнодисперсійне і т.д.;

- за режимом функціонування: встановлення безперервної або циклічної дії;
 - за характером шару палива та його взаємодії з окислювачем - установки: із щільним шаром, зі зваженим шаром, із «киплячим» шаром;

- за кількістю ступенів свободи газогенератора в просторі: статичні, динамічні з одним ступенем свободи (обертання навколо власної осі), динамічні з двома ступенями свободи (обертання навколо власної осі та зміна її кута нахилу щодо горизонту); - за ступенем механізації процесу в газогенераторі: немеханізовані, напівмеханізовані та механізовані.

Конструктивно-технологічні параметри газогенератора багато чому визначаються елементарним складом твердого палива, у якому планується надалі експлуатувати газогенератор. Елементарний склад твердого палива можна подати у вигляді схеми [11], Рис. 2.1.

Індекси	Склад палива						
	C	H	O	N	S	A	W
<i>o</i>	Органічна маса						
<i>g</i>	Горюча маса						
<i>c</i>	Суха маса						
<i>p</i>	Робоче паливо						

Рис. 2.1. Схема елементарного складу твердого палива

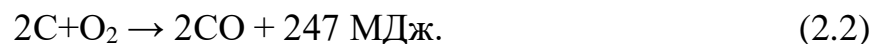
Кожен складовий елемент палива визначають окремо, включаючи золу та вологу. Що дозволяє отримати загальне уявлення про досліджуване паливо, як про механічну суміш визначених елементів. Насправді складові елементи перебувають у паливі над вільному стані, а вигляді складних органічних сполук. Внаслідок чого розрахункові та отримані експериментальним шляхом результати досліджень матимуть деякі відмінності [7].

Робоче паливо (Рис. 2.1) складається з сухої маси, горючої маси та органічної маси. Корисною, у плані роботи, є горюча маса палива. Сумарний вміст вологи та золи у паливі, характеризує його негорючу складову, тобто. баласт.

У теплотехнічних розрахунках при складанні матеріального та теплового балансу газифікації твердого палива, сірку (S) у розрахунок не приймають, внаслідок її незначного вмісту в горючій масі палива порівняно з вуглецем (C).

Незважаючи на все різноманіття видів і типів газогенераторних установок, процес перетворення твердого палива в газоподібне характеризується одними і тими самими хімічними реакціями. Різні автори наводять різні кількісні оцінки значення теплоти, що виділяється або поглинається при однотипній хімічній реакції. Хімічні реакції, що наводяться нижче, а також їх конкретні числові значення теплоти, що виділяється або поглинається при перебігу даних реакцій, представлені для загального розуміння процесу газифікації твердого палива газогенераторних установках.

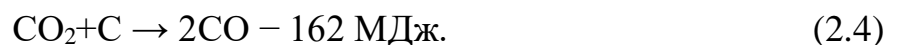
У зоні газифікації газогенератора при високих температурах протікають наступні реакції [12]:



Ці екзотермічні реакції повного і неповного окислення вуглецю палива, що одночасно протікають, є первинними. Отриманий монооксид вуглецю може вступати в подальшу взаємодію з киснем:

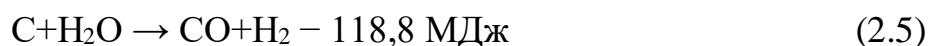


При цьому CO_2 може реагувати з вуглецем:



Рівновагу реакції (2.1), (2.2) та (2.3) зміщені у бік утворення CO_2 та CO , при температурах, характерних для процесів газифікації твердих палив (1000...1500 С). Реакція (2.4) ендотермічна, її рівновага зміщується у бік отримання $3I$ при підвищенні температури, з підвищенням тиску вихід $3I$ знижується. Фактичне співвідношення між оксидами вуглецю залежить від температури, тиску, тривалості взаємодії, реакційної спроможності палива тощо.

Водяна пара взаємодіє з вуглецем палива при високих температурах:





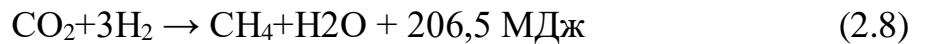
Рівновага в реакціях (2.5) та (2.6) зсувається вправо при підвищенні температури та зниженні тиску.

У суміші оксидів вуглецю, водню та водяної пари протікає реакція:



При температурах вище 1000°C рівновага зрушена у бік вихідних речовин. Збільшення тиску впливає стан рівноваги.

Метан, що міститься в генераторному газі, утворюється за реакціями:



а також внаслідок термічного розкладання органічної маси палива. Зі зниженням температури та підвищенням тиску рівновага у цих реакціях зміщується у бік утворення метану.

Для газогенератора зверненого процесу газифікації (Рис.) розподіл вищенаведених хімічних реакцій перетворення твердого палива на генераторний газ зонами газогенератора можна подати у вигляді схеми, рисунку 2.2.

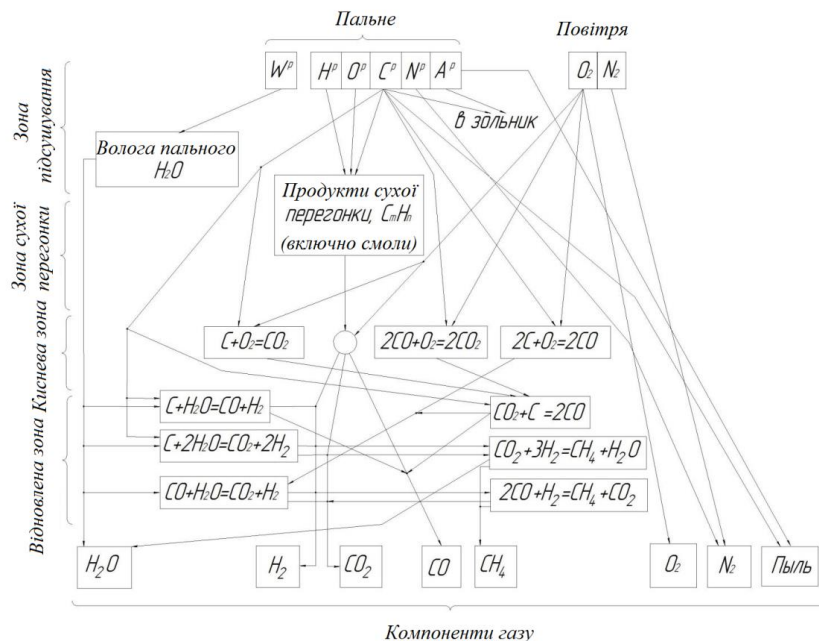


Рис. 2.2. Схема перетворення твердого палива на генераторний газ за зонами газогенератора оберненого процесу

До основних факторів, що надають значний вплив на процес газифікації, можна віднести: обраний тип процесу газифікації (прямий, обернений або поперечний), конструктивні параметри газогенератора, вид палива, температуру по робочих зонах газогенератора, спосіб подачі та швидкість витікання повітряного струменя з фурми (повітряного) жиклера) в реакційну зону газогенератора, витрата генераторного газу.

Проведений аналіз наведених вище хімічних реакцій, що супроводжують процес перетворення твердого палива в газоподібне, дозволяє зробити висновок, що первинними є окислювальні реакції. У цьому тепловий баланс процесу позитивний (т.к. екзотермічні реакції). Відновлювальні реакції будуть вторинними, оскільки вони відбуваються із поглинанням теплоти (ендотермічні реакції). Внаслідок цього, процесом газифікації в газогенераторній установці можна керувати не тільки за рахунок конструктивних параметрів газогенератора, витрати генераторного газу, виду твердого палива, що газифікується, але також за рахунок кількості і способу (режиму) подачі окислювача (O₂) в реакційну зону газогенератора.

Тепловий баланс процесу газифікації складається з прибуткової та видаткової частини. І в загальному вигляді може бути записаний рівнянням:

$$Q_T^x + Q_B^\phi = (Q_G^x + Q_G^\phi + Q_{см}) \cdot V + \Sigma Q_{пот} \quad (2.10)$$

де

Q_T^x – потенційна теплова (хімічна) енергія газифікованого палива, кВт;

Q_B^ϕ - теплова енергія (фізичне тепло) дутьового повітря, кВт;

Q_G^x - потенційна теплова (хімічна) енергія отриманого газу, кВт;

Q_G^ϕ - теплова енергія (фізичне тепло) одержаного газу, кВт;

$Q_{см}$ - потенційна теплова (хімічна) енергія смол та продуктів сухої перегонки палива, кВт;

$\Sigma Q_{\text{пот}}$ - втрати теплової енергії внаслідок механічної неповноти газифікації палива (втрати з винесенням та шлаками), втрати у навколишнє середовище, кВт;

V - вихід газу, $\text{нм}^3/\text{кг}$ палива.

Аналіз виразу 2.10 показує, що прибуткова частина рівняння теплового балансу значною мірою визначається потенційною тепловою (хімічною) енергією палива, що застосовується в процесі газифікації. Основні характеристики палив для газогенераторів наведені у таблиці 2.1 ілюструють варіабельність елементарного хімічного складу та як наслідок – енергетичної цінності палива. Для досягнення оптимальних характеристик процесу газифікації різних видів палива потрібне застосування параметричного управління подачею окислювача в реакційну зону газогенератора.

Прибуткова частина теплового балансу також може бути збільшена за рахунок підвищення теплової енергії (фізичного тепла) дутьового повітря, що подається в реакційну зону газогенератора. Що можна зробити за рахунок рекуперації теплової енергії (фізичного тепла) отриманого генераторного газу.

Витратна частина теплового балансу може бути скоригована за рахунок зменшення втрат теплової енергії у навколишнє середовище. З цією метою необхідно провести заходи щодо теплоізоляції елементів газогенератора схильних до теплових навантажень.

Провівши аналіз науково-технічної та патентної літератури, а також комерційні пропозиції готових технічних рішень з газогенераторної тематики, можна виділити загальні недоліки сучасних газогенераторних установок, що працюють спільно з ДВЗ.

1. Переважна більшість газогенераторних установок, як транспортного, так і стаціонарного типу, є адаптованими для сучасних умов виробництва і використання копіями газогенераторів 30..40 років ХХ століття. Найчастіше копіями не зовсім вдалим моделей газогенераторів. Виняток становлять газогенераторні конструктори "Gasifier Experimenters Kit (GEK)". Під час їх

проектування американські інженери використовували системний підхід, за якого розглядали в комплексі систему газогенераторна установка - двигун.

2. Якість виробленого генераторного газу в газогенераторній установці варіюється залежно від параметрів вихідної сировини (розмір, вологість, щільність тощо). Не можна одним клацанням перемикача перевести газогенератор на інший вид газифікованого палива. ДВЗ з іскровим запалюванням починає більш-менш стійко працювати, коли в генераторному газі більше 30 % горючих компонентів за об'ємом. Якщо менше, то двигун не запускається (винятком є газодизельний цикл), хоча факел у пальнику горить добре.

3. Якість генераторного газу також змінюється залежно від параметрів і режимів його виробництва. Усі газогенератори, їхні робочі характеристики, розраховуються з умови максимальної продуктивності за генераторним газом. Тобто з хорошого палива для газифікації, за максимального споживання газу ДВЗ, у правильно розрахованому газогенераторі отримують хороший газ. Але щойно зменшиться об'єм споживаного газу, змінюється температурний і дугтвовий режим у газогенераторі (не одразу, звісно, оскільки система газогенератора має певну інерційність) і як наслідок змінюється якісний склад генераторного газу в гірший бік.

4. Газогенератор керує двигуном, а не двигун газогенератором. Переведення стандартного ДВЗ з іскровим запалюванням на живлення генераторним газом призводить до погіршення експлуатаційних характеристик: зниження номінальної літрової потужності, зниження перевантажувальної здатності і прийомистості ДВЗ. Для підвищення експлуатаційних характеристик під час роботи на генераторному газі потрібне доопрацювання конструкції ДВЗ (підвищення ступеня стиснення, зменшення опору у впускному тракті). А також застосування технічних засобів для збільшення питомої щільності паливо-повітряного заряду в циліндрі ДВЗ за рахунок системи наддуву та охолодження

повітря, використання сумішевого палива (альтернативного і товарного) для роботи ДВЗ за газодизельним циклом тощо.

5. Газогенератор добре працює на сталому режимі і погано на перехідних режимах (max \Leftrightarrow min). Чинить негативний вплив на тривалість перехідного режиму роботи ДВЗ інерційність газогенераторної установки.

Найперспективнішим, як з технічного, так і з технологічного погляду є шлях удосконалення конструкції та заходи щодо оптимізації організації процесу газифікації в газогенераторній установці. Основне завдання, яке необхідно розв'язати – це розглянути ДВЗ і газогенераторну установку як сукупну систему, а не як набір окремих елементів і пристроїв: ДВЗ, фільтра, охолоджувачі, газогенератор тощо.

Для усунення частини перерахованих вище недоліків, таких як відсутність системи управління процесом газифікації твердого палива, інерційність газогенератора та мінімізації негативного впливу решти, нами запропоновано нове технічне рішення конструкції газогенераторної установки - газогенератора з параметричним регулюванням робочого процесу в площині фурмового пояса.

На рис. 1 наведено загальний вигляд газогенератора, а на рис. 2 наведено схему розподілу факела повітряного дуття з фурм газогенератора, який використовує принцип параметричного регулювання робочого процесу в площині фурменного поясу.

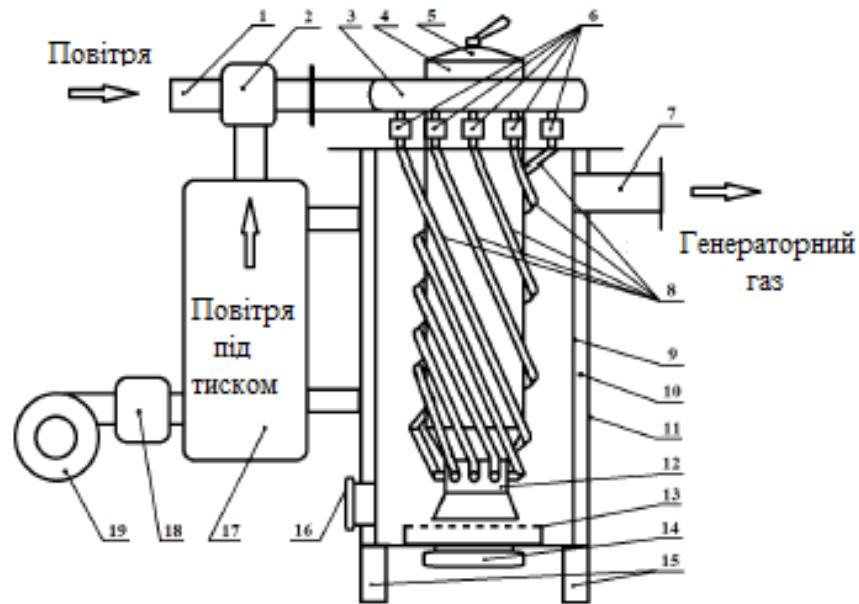


Рис. 2.3. Загальний вигляд газогенератора: 1 – повітряний патрубок, 2 – триходовий електромагнітний клапан, 3 – повітряний колектор, 4 – камера газифікації, 5 – завантажувальний люк із запірним механізмом, 6 – система електромагнітних клапанів, 7 – газовідвідний патрубок, 8 – індивідуальні повітровідвідні трубки дугтьових фурм, 9 – газовий резервуар, 10 – термоізоляційний футляр, 11 – зовнішній захисний кожух, 12 – зона фурмового пояса, 13 – зольникова решітка, 14 – зольниковий люк, 15 – опори, 16 – технологічний люк, 17 – повітряний резервуар, 18 – зворотний клапан, 19 – вентилятор

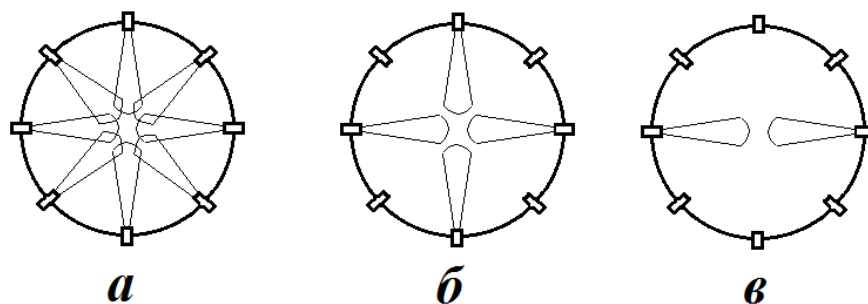


Рис. 2.4. Схема розподілу факела повітряного дугтя з фурм газогенератора: а) номінальний режим (витрата генераторного газу споживачем максимальна); б) $\frac{1}{2}$ номінального режиму; в) режим мінімального споживання генераторного газу.

РОЗДІЛ 3

**РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РІЗНИХ ОБСЯГІВ ВИТРАТИ
ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ**

Розрахунок продуктивності газогенератора, зверненого процесу газифікації, традиційної конструкції працюючого разом із ДВС здійснюється наступним чином. Для чотиритактного ДВЗ годинна витрата паливоповітряної (газоповітряної) суміші (нм³/год), наведеної до 0⁰С та 101,32472 кПа, розраховується за формулою:

$$V_{\text{см}} = 60 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot S \cdot \frac{i \cdot n}{2} \cdot \frac{273}{273 + t_0} \cdot \frac{B_a}{101,32472} \cdot \eta_{\theta}, \quad (3.1)$$

де d - діаметр циліндра, м;

S - хід поршня, м;

i - число циліндрів;

n - частота обертання колінчастого валу двигуна, хв-1;

t_0 - температура довкілля, 0С;

B_a - тиск довкілля, кПа;

η_{θ} - коефіцієнт наповнення двигуна для обраних значень t_0 і B_a .

Кількість генераторного газу (нм³/год), споживаного ДВС за 1 годину, наведеного до 0⁰ С і 101,32472 кПа, розраховується за формулою:

$$V_{\Gamma} = \frac{V_{\text{см}}}{1 + \alpha \cdot L_0 \cdot \omega}, \quad (3.2)$$

де α - коефіцієнт надлишку повітря;

L_0 - теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 нм³ генераторного газу;

ω - коефіцієнт об'ємного вмісту парів води в генераторному газі.

Розрахунок обсягу повітря ($\text{нм}^3/\text{год}$), що надходить у газогенератор, можна зробити за балансом азоту. Витрата повітря при газифікації розраховується за такою формулою:

$$V_B = \frac{N_2^G \cdot E - \frac{N_p}{1,251}}{N_2^B} \cdot G, \quad (3.3)$$

де N_2^G - вміст азоту у генераторному газі, м^3 ;

E - вихід генераторного газу, $\text{нм}^3/\text{кг}$;

N_p - вміст азоту в газифікованому паливі, $\text{кг}/\text{кг}$;

N_2^B - вміст азоту в 1 м^3 повітря, що дорівнює $0,79 \text{ м}^3$;

$1,251$ – вага 1 нм^3 азоту, кг ;

G - кількість газифікованого палива, $\text{кг}/\text{год}$.

Якщо здійснюється підігрів повітря, що надходить у газогенератор, до температури, то його дійсний об'єм ($\text{м}^3/\text{год}$), буде дорівнює:

$$V_B^t = V_B \cdot \frac{101,32472}{B_a} \cdot \frac{273 + t^H}{273}, \quad (3.4)$$

$$V_B^t = V_B \cdot \frac{101,32472}{B_a} \cdot \frac{273 + t^H}{273}, \quad (3.5)$$

де V_B - обсяг повітря, що надходить у газогенератор, $\text{нм}^3/\text{год}$;

t^H - температура підігрітого повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Виходячи із заданої швидкості дуття $v(\text{м}/\text{с})$, та обраної кількості фурм, n розраховується діаметр дутьових фурм d_ϕ (мм):

$$d_\phi = 18,85 \cdot \sqrt{\frac{V_B^t}{k \cdot v}}, \quad (3.6)$$

де - обсяг підігрітого повітря, що надходить у газогенератор, $\text{м}^3/\text{год}$;

- кількість дутьових фурм;

- задана швидкість дуття, $\text{м}/\text{с}$.

У своїх роботах автори дають різні кількісні оцінки оптимальної швидкості повітря із дутьової фурми. Але всі вони сходяться в одному, що швидкість витікання повітря з дутьової фурми в реакційну зону газогенератора є одним з

ключових факторів, що впливають на процес газифікації та склад генераторного газу. Внаслідок цього вони експериментальним шляхом виводять оптимальну, на їхню думку, швидкість закінчення повітря з дутьової фурми, для конкретного виду палива, типу газогенератора та виду споживача генераторного газу.

Прийнявши за відправну точку в дослідженні гіпотезу про ключовий вплив швидкості закінчення повітря з дутьової фурми газогенератора (при цьому фізико-механічні характеристики твердого палива, конструктивні особливості газогенераторної установки тут не розглядаються, хоча також значно впливають на процес газифікації), проведемо аналіз вищенаведеної методики розрахунку продуктивності газогенератора, зверненого процесу газифікації, традиційної конструкції працюючого спільно з ДВС.

Швидкість витікання повітря із дутьової фурми газогенератора залежить:

1. від діаметра дутьових фурм та їх кількості в реакційній зоні газогенератора. Ці параметри задаються конструктивно на етапі проектування газогенератора та у процесі роботи не змінюються;

2. температури підігрітого повітря, що надходить у реакційну зону газогенератора. Температура підігрітого повітря залежить від наявності/відсутності системи підігріву та теплоізоляції корпусу газогенератора, що також задається конструктивно та в процесі роботи газогенератора не змінюється;

3. витрати генераторного газу ДВС, який залежить від робочого об'єму двигуна, частоти обертання колінчастого валу двигуна та коефіцієнта надлишку повітря, що характеризує якісний склад паливоповітряної суміші залежно від робочого режиму ДВС.

Робочий об'єм двигуна в процесі його роботи не змінюється. Цей параметр задається конструктивно під час проектування газогенератора. Але при використанні спільно з газогенератором ДВЗ, з робочим об'ємом двигуна, відмінним від розрахункових (проектних), швидкість витікання повітря з дутьових фурм буде змінюватися.

Частота обертання колінчастого валу двигуна у процесі експлуатації змінюється у межах (від холостого ходу до max значень). Внаслідок цього, у значних межах змінюється витрата генераторного газу та швидкість витікання повітря з дутьових фурм газогенератора. Всі газогенератори, їх робочі характеристики, розраховуються з умови максимальної продуктивності по генераторному газу.

Співвідношення коефіцієнта надлишку повітря характеризує якісний склад паливоповітряної суміші, що подається в ДВЗ, і залежить від його робочих режимів (холостий хід, накидання навантаження на ДВЗ, режим навантаження і т.д.). Впливає на витрату генераторного газу незначно (незначно, якщо порівнювати із впливом частоти обертання).

У процесі роботи газогенераторної установки змінюється її гідравлічний опір, що у свою чергу впливає на η - коефіцієнт наповнення двигуна паливоповітряною сумішшю і, як наслідок, на швидкість витікання повітря з дутьових фурм. Ця величина перестав бути постійною і має імовірнісний характер (стохастичний). На неї впливають фізико-механічні характеристики твердого палива, що бере участь у газогенераторному процесі, тип та ступінь забруднення системи очищення генераторного газу. Практично завдання вирішується введенням коефіцієнта запасу продуктивності газогенератора, або застосуванням компенсаційних пристроїв на лінії подачі повітря в газогенератор або лінії відбору генераторного газу з газогенератора.

Виходячи з наведеного вище аналізу варіативних факторів, що впливають на функціонування газогенераторної установки, розглянемо можливі режими функціонування газогенератора з параметричним регулюванням робочого процесу в площині фурменного пояса.

Рух повітря живлення однієї дутьової фурми в газогенераторі з параметричним управлінням робочим процесом, з атмосфери в реакційну зону можна як блок - схеми, Рис. 2.5.

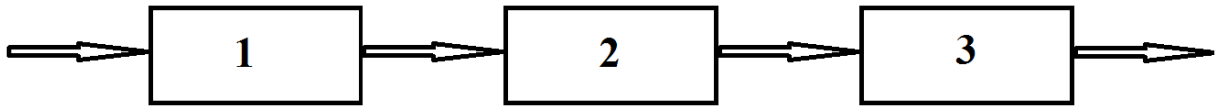


Рис. 3.1. Блок - схема руху повітря в газогенераторі: 1 – повітряний електромагнітний клапан, 2 індивідуальна повітропідвідна трубка дутевої фурми, 3 - дутева фурма

Елементи схеми з'єднані послідовно, причому вихідна величина одного елемента подається на вхід наступного. Перший елемент схеми - повітряний електромагнітний клапан, що здійснює управління повітряним потоком, перебуваючи в одному з двох стійких станів: відкритому або закритому. Другий елемент схеми - індивідуальна воздухоподводящая трубка, сприймає повітряний потік від повітряного електромагнітного клапана і транспортує його до дутевої фурми, шляхом нагрівання його. Третій елемент схеми – дутева фурма формує смолоскип повітряного дуття у реакційній зоні газогенератора.

Застосування повітряних електромагнітних клапанів у газогенераторі з параметричним регулюванням робочого процесу в площині поясу фурмену дозволяє здійснити три основних режими функціонування дутьових фурм:

1. Статичний режим функціонування. Залежно від витрати генераторного газу в роботі задіяно різну кількість дутьових фурм – k . При цьому швидкість витікання повітря з дутевої фурми газогенератора змінюється в межах $\pm \Delta v$ від оптимальної швидкості. У загальному вигляді ідеалізований графік витрати повітря газогенератора, що проходить через дутьові фурми, залежно від їх працюючої кількості наведено на рис. 3.2. По осі абсцис відкладено тимчасові інтервали - роботи дутьових фурм. На інтервалі $\tau_0 - \tau_1$. По осі ординат відкладено умовну витрату повітря - $V_в$ і кількість включених у роботу дутьових фурм - k .

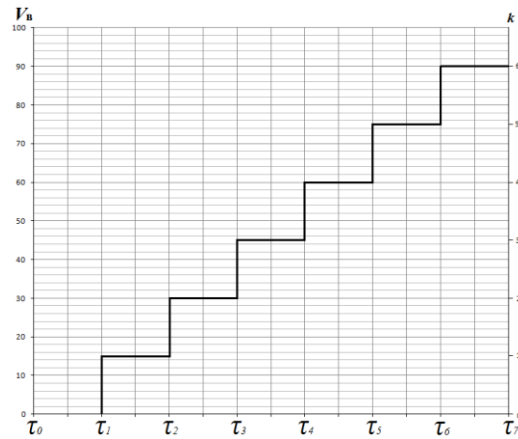


Рис. 3.2. Ідеалізований графік витрати повітря в залежності від кількості задіяних дутьових фурм

Розрахунок продуктивності газогенератора в даному випадку проводиться за витратою генераторного газу та оптимальною швидкістю закінчення повітря з дутьової фурми газогенератора.

2. Динамічний, синхронний режим функціонування. Залежно від витрати генераторного газу в роботі задіяно однакову кількість дутьових фурм. При цьому дутьові фурми одночасно включаються та вимикаються в роботу (тобто працюють синхронно). Змінюючи співвідношення між часом роботи і часом відключення фурми (тобто регулюючи шпаруватість), можна підтримувати швидкість закінчення повітря газогенератора $v_{cp} \approx Const$ від оптимальної швидкості, при різних витратах генераторного газу споживачем. Графік витрати повітря газогенератора, що проходить через дутьові фурми, залежно від режиму їх роботи, наведено на рис. 3.3.

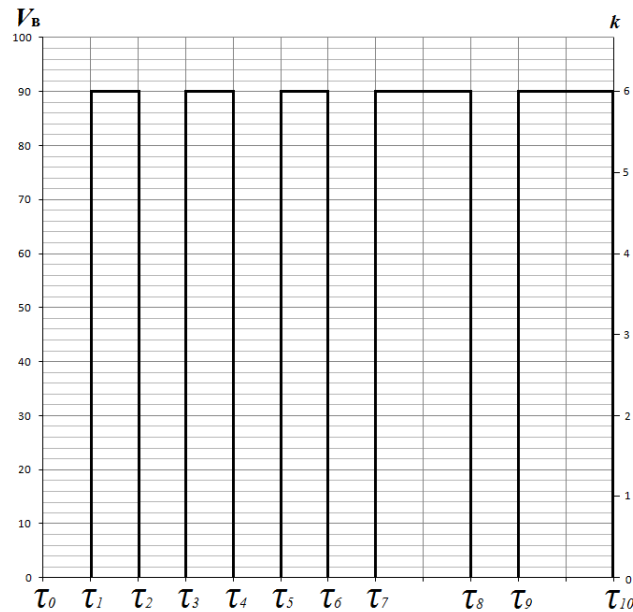


Рис. 3.3. Ідеалізований графік витрат повітря через дутьові фурми при динамічному, синхронному режимі їх роботи

По осі абсцис відкладено часові інтервали роботи дутьових фурм. На інтервалі $\tau_0 - \tau_1$ усі фурми вимкнені, на інтервалі $\tau_1 - \tau_2$ усі фурми включені тощо. Збільшення витрати повітря в даному прикладі визначається збільшенням робочого інтервалу в роботі дутьових фурм (інтервал роботи $\tau_5 - \tau_6$ менше інтервалу $\tau_7 - \tau_8$). По осі ординат відкладено умовну витрату повітря - V_B і кількість включених у роботу дутьових фурм - k .

Розрахунок продуктивності газогенератора в цьому випадку буде проводитися за витратою генераторного газу та оптимальною швидкістю закінчення повітря з фурні дуть газогенератора. При цьому еквівалентна витрата повітря ($\text{м}^3/\text{год}$), що йде на газифікацію твердого палива в газогенераторі, при заданому режимі регулювання може бути розрахований за формулою:

$$V_{B. \text{ экв.}} = \sqrt{\frac{V_B^2 \tau_1 + V_B^2 \tau_2 + \dots + V_B^2 \tau_n}{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n}}, \quad (3.7)$$

де V_B - витрата повітря на тимчасовому інтервалі, $\text{м}^3 / \text{год}$;

τ - тимчасовий інтервал, у якому здійснено витрату повітря V_B , год.

3. Динамічний, асинхронний режим функціонування. Залежно від витрати генераторного газу в роботі задіяно однакову кількість дутьових фурм. При

цьому дутьові фурми включаються та вимикаються в роботу зі зміщенням у часі один щодо одного (тобто працюють асинхронно). Змінюючи співвідношення між часом роботи та часом відключення фурми (тобто регулюючи шпаруватість), кількість задіяних у роботі фурм, можна регулювати об'єм та швидкість закінчення повітря з дутьової фурми газогенератора, для різних режимів витрати генераторного газу споживачем. Зміщення у часі включення дутьових фурм наведено на графіку 3.4. Графік витрати повітря, що проходить через дутьові фурми газогенератора, залежно від режиму їхньої роботи наведено на 3.5. Який показує, що змінюючи співвідношення між часом роботи і часом відключення фурми (тобто регулюючи шпаруватість), а також керуючи зміщенням у часі їх включення та вимкнення, при постійній кількості задіяних у роботі фурм, можна підтримувати швидкість закінчення повітря з дутьової фурми газогенератора в межах $\pm\Delta$ від оптимальної швидкості, при різних витратах генераторного газу споживачем. При цьому, на відміну від динамічного синхронного режиму функціонування дутьових фурм, будуть відсутні явно виражені пульсації витрати повітря.

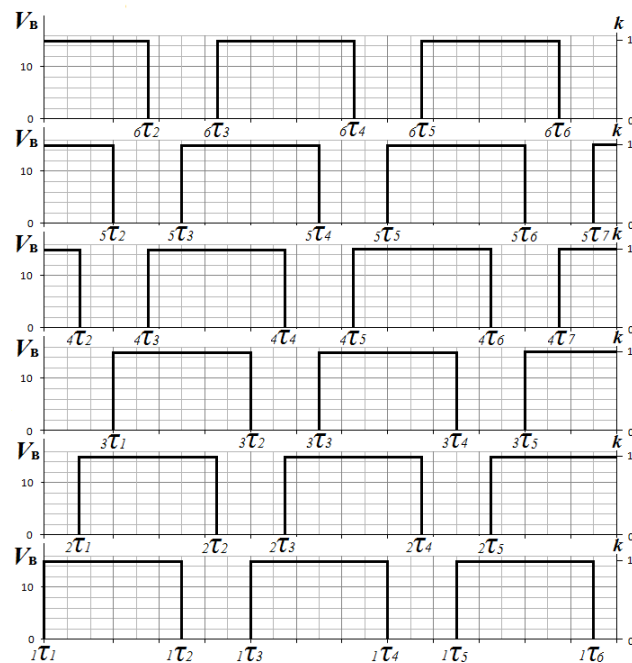


Рис. 3.4. Графік усунення в часі включення дутьових фурм при динамічному, асинхронному режимі їх роботи

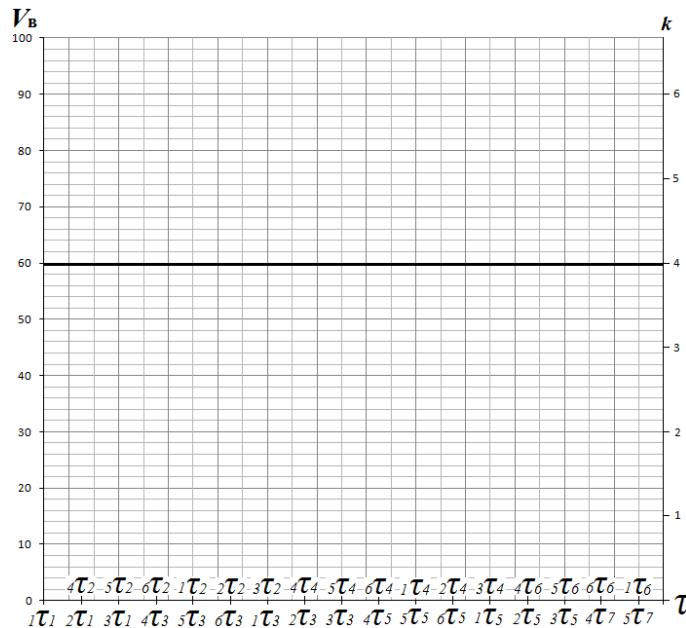


Рис. 3.5. Ідеалізований графік витрат повітря через дутьові фурми при динамічному, асинхронному режимі їх роботи

По осі абсцис відкладено часові інтервали роботи дутьових фурм. По осі ординат відкладено умовну витрату повітря - $V_{в}$ і кількість включених у роботу дутьових фурм - k .

Розрахунок продуктивності газогенератора в цьому випадку буде проводитися за витратою генераторного газу та оптимальною швидкістю закінчення повітря з фурні дуть газогенератора.

Управління повітряним потоком, що проходить через дутьову фурму, здійснюється за допомогою повітряного електромагнітного клапана. Статична витрата повітря (кг/год) через повітряний електромагнітний клапан може бути визначений за формулою:

$$G_{в.ст.} = \frac{529 \cdot K_v}{\sqrt{\frac{T_1}{\Delta P \cdot P_2 \cdot \gamma_{в}}}}, \quad (3.8)$$

де K_v - Коефіцієнт умовної пропускної спроможності повітряного електромагнітного клапана;

T_1 - температура середовища до клапана, 0К;

ΔP - перепад тиску на клапані, кПа;

P_2 - абсолютний тиск середовища після клапана, кПа;

γ_v - щільність вхідного повітря, кг/м³, при $t = 0$ °С і $B_a = 101,32472$ кПа.

Для приведення статичної витрати повітря - до розмірності м³/год значення статичної витрати повітря (кг/год), отримане за формулою, необхідно помножити на питомий об'єм вхідного повітря, для відповідної температури навколишнього середовища та атмосферного тиску.

Виконавши перетворення формули щодо питомого об'єму повітря для приведення статичної витрати повітря (кг/год) до розмірності (м³/год), отримаємо:

$$V_{\text{в.ст.}} = \frac{529 \cdot K_v}{\sqrt{\frac{\gamma_1 \cdot \gamma_v}{\Delta P - P_2}}} \quad (3.9)$$

За результатами пошукових досліджень, виконаних на експериментальній установці для моделювання режимів роботи повітряних електромагнітних клапанів (наведеної в розділі Віші) з'ясувалося, що теоретичне уявлення про витрату повітря через фурм дутьїв відрізняється від реально протікає процесу витрати.

Ідеалізовані графіки витрати повітря для процесу газифікації твердого палива в газогенераторі є дуже умовними, так як не враховують індивідуальні особливості електромагнітних повітряних клапанів, гідравлічний опір газогенераторної установки, фізико-механічний склад твердого палива, що йде на газифікацію (гідравлічний опір реакційного). Також у них зроблено припущення, що електромагнітний клапан управління дутьєвою фурмою газогенератора переходить із одного стійкого стану (наприклад: клапан повністю закритий) в інший стійкий стан (наприклад: клапан повністю відкритий), миттєво. З урахуванням проведених пошукових досліджень реальний графік витрати повітря через повітряний електромагнітний клапан представимо в наступному вигляді (рис. 3.6).

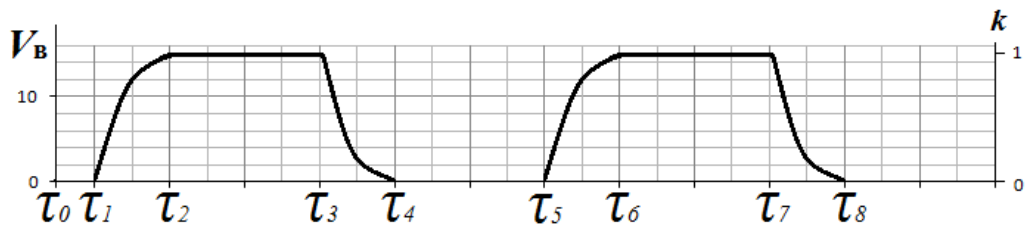


Рис. 3.6. Графік реальної витрати повітря через повітряний електромагнітний клапан

Аналіз режиму витрати повітря, що проходить через повітряний електромагнітний клапан управління дугьєвой фурмою газогенератора, дозволяє виділити чотири явно виражені режими функціонування. На інтервалі $\tau_1 - \tau_2$ здійснюється відкриття електромагнітного клапана. На перехід електромагнітного клапана із закритого у відкритий стан витрачається певний час, який залежить від перепаду тиску на клапані - . Як показують пошукові дослідження, зі збільшенням перепаду тиску швидкодія клапана збільшується. Зміна перепаду тиску на електромагнітному клапані і як наслідок витрати повітря через нього на інтервалі 1 - 2, має нелінійну характеристику. У загальному вигляді характеристика витрат повітря на режимі відкриття електромагнітного клапана може бути представлена поліномом другого порядку.

Інтервал графіка $\tau_2 - \tau_3$ характеризує відкритий стан електромагнітного клапана, при цьому перепад тиску на клапані - приймає мінімальне значення, яке характеризується власним гідравлічним опором клапана, обумовленим його конструктивно - технологічними характеристиками. На даному інтервалі витрата повітря через електромагнітний клапан буде постійною і може бути розрахована за формулою статичної витрати.

Перехід електромагнітного клапана з відкритого закритий стан здійснюється на інтервалі $\tau_3 - \tau_4$ графіка. Як показують пошукові дослідження, характеристики витрати повітря через електромагнітний клапан на інтервалі $\tau_1 - \tau_2$ і інтервалі $\tau_3 - \tau_4$ графіка, мають істотні відмінності, як за часом інтервалу, так і по конфігурації кривої витрати.

Інтервал графіка $\tau_4 - \tau_5$ характеризує закритий стан електромагнітного клапана, при цьому перепад тиску на клапані приймає максимальне значення.

Для коректного розрахунку витрати повітря через електромагнітний клапан необхідно використовувати інтегральну функцію на часовому інтервалі від.

Для спрощення математичного запису та обчислення надалі підінтегральної функції зробимо заміну виразу на рівнозначну тотожну функцію. Виходячи з графіка, витрата повітря через повітряний електромагнітний клапан за одиничний цикл його роботи визначимо як площу, обмежену кривою графіка на часовому інтервалі від до:

$$V_B = \int_{\tau_1}^{\tau_4} V_{B.ст.}(x) dx. \quad (3.10)$$

Тоді витрата повітря через повітряний електромагнітний клапан за годину його роботи знайдемо за формулою, позначивши кількість циклів роботи m :

$$V_B = \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}}^{\tau_{4i+4}} V_{B.ст.}(x) dx, \quad (3.11)$$

де τ - розмірність часу, годину;

m - кількість циклів роботи повітряного електромагнітного клапана за період часу рівний одній годині.

Для групи повітряних електромагнітних клапанів, що функціонують у динамічному, синхронному режимі сумарна витрата повітря ($m^3/\text{год}$), визначимо як суму витрати повітря через кожний повітряний електромагнітний клапан після циклів його роботи:

$$\begin{aligned} \Sigma V_B = & k_{1 \text{ кл.}} \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}}^{\tau_{4i+4}} V_{B.ст.}(x) dx + k_{2 \text{ кл.}} \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}}^{\tau_{4i+4}} V_{B.ст.}(x) dx + \dots \\ & k_{p \text{ кл.}} \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}}^{\tau_{4i+4}} V_{B.ст.}(x) dx, \end{aligned} \quad (3.12)$$

де $k_{p \text{ кл.}}$ - поправочний коефіцієнт, що характеризує індивідуальні особливості повітряного електромагнітного клапана, що управляє дутьовою фурмою;

p - № повітряного електромагнітного клапана керуючого дутьової фурмою.

Провівши перетворення формули, отримаємо:

$$\Sigma V_B = \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}}^{\tau_{4i+4}} V_{B.ст.}(x) dx (k_{1 \text{ кл.}} + k_{2 \text{ кл.}} + \dots + k_{p \text{ кл.}}). \quad (3.13)$$

де p - № повітряного електромагнітного клапана, що управляє дутьовою фурмою;

Δt - крок часу асинхронного включення та вимикання клапана, що управляє дутьовою фурмою.

У газогенераторах традиційних конструкцій, без керування подачею окислювача в реакційну зону газогенератора, нагрівання дутьового повітря мінімальний. Що обумовлено як малим об'ємом повітряного колектора, так і невеликим часом перебування повітря в ньому. Загальний вигляд камери газифікації наведено на рисунку 3.7.

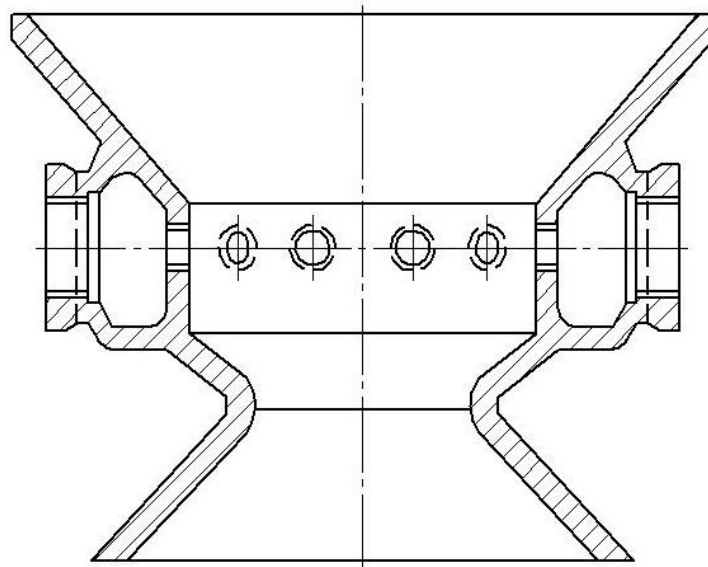


Рис. 3.7. Загальний вигляд камери газифікації газогенератора традиційної конструкції

Розроблена конструкція газогенераторної установки має у своїй конструкції індивідуальні воздухоподводящие трубки дутьових фурм. Це дозволяє не лише здійснювати індивідуальне керування потоками дутьового повітря. При русі повітря від повітряного електромагнітного клапана до дутьової фурми, по індивідуальній повітропідвідній трубці, здійснюється його нагрівання за рахунок фізичного тепла генераторного газу, що омиває протитечією зовнішні стінки повітропідвідної трубки.

Процес передачі теплоти від генераторного газу до повітря характеризується рівнянням теплового балансу теплообмінного апарату:

$$\eta \cdot V_{\Gamma} \cdot C_{\text{рг}} \cdot (T_{\Gamma}' - T_{\Gamma}'') = V_{\text{в}} \cdot C_{\text{рв}} \cdot (T_{\text{в}}'' - T_{\text{в}}') \quad (3.14)$$

де V_{Γ} - об'ємний витрата гріючого середовища (генераторного газу), м³/год;

$V_{\text{в}}$ - об'ємна витрата нагрівається середовища (повітря), м³/год;

$C_{\text{рг}}$ - теплоємність генераторного газу, кДж/(кг·°К);

$C_{\text{рв}}$ - теплоємність повітря, кДж/(кг·°К);

T_{Γ}' - температура генераторного газу на вході, °К;

T_{Γ}'' - температура генераторного газу на виході, °К;

$T_{\text{в}}'$ - температура повітря на вході, °К;

$T_{\text{в}}''$ - температура повітря на виході, °К;

η - коефіцієнт корисної дії теплообмінного апарату.

При цьому з метою спрощення розрахунків приймається, що потік генераторного газу та температурні поля по всьому об'єму теплообмінного апарату розподілені рівномірно. Права частина рівняння характеризує теплову навантаження теплообмінного апарату, тобто. у нашому випадку, теплову енергію (кВт), придбану повітрям в результаті руху по індивідуальній повітропідвідній трубці в газогенераторі, яку можна записати в наступному вигляді:

$$Q_{\text{в}} = V_{\text{в}} \cdot C_{\text{рв}} \cdot (T_{\text{в}}'' - T_{\text{в}}') \quad (3.15)$$

Так як індивідуальна повітропідвідна трубка є теплообмінним апаратом періодичної дії, необхідно розглянути процес теплообміну з урахуванням режимів функціонування повітряного електромагнітного клапана управління.

В індивідуальній повітряній трубці будуть спостерігатися два режими нагрівання повітря. Перший режим нагрівання здійснюється при відкритому повітряному електромагнітному клапані. Атмосферне повітря проходить через повітряний електромагнітний клапан і по воздухоподводящей трубці прямує до дутьевой фурми, нагріваючись у міру руху. Об'єм цього повітря можна записати

(м³), а для обчислення скористатися виразом. Другий режим нагрівання здійснюється при закритому повітряному електромагнітному клапані. При цьому нагрівається обсяг повітря укладений в трубі, що підводить повітря, між повітряним електромагнітним клапаном і дутьевої фурмою. Об'єм цього повітря можна записати (м³). Для його обчислення необхідно визначити внутрішній об'єм індивідуальної повітряної трубки за такою формулою:

Для групи індивідуальних повітряних трубок під керуванням повітряних електромагнітних клапанів, що функціонують у динамічному, синхронному режимі, кількість теплової енергії, придбаної повітрям (кВт/год), з урахуванням формули, визначимо як:

$$\Sigma Q_B = \left(\left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}}^{\tau_{4i+4}} V'_B(x) dx \right) + \left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+4}}^{\tau_{4i+5}} V''_B(x) dx \right) \right) \cdot (k_{1 \text{ кл.}} + k_{2 \text{ кл.}} \cdot k_{p \text{ кл.}}) \cdot (c_{pB} \cdot (T'_B - T''_B)). \quad (3.16)$$

Для групи індивідуальних повітряних трубок під керуванням повітряних електромагнітних клапанів, що функціонують у динамічному, асинхронному режимі, кількість теплової енергії, придбаної повітрям (кВт/год), з урахуванням формули, визначимо як:

$$\begin{aligned} \Sigma Q_B = & k_{1 \text{ кл.}} \cdot \left(\left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}}^{\tau_{4i+4}} V'_B(x) dx \right) + \left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+4}}^{\tau_{4i+5}} V''_B(x) dx \right) \right) + k_{2 \text{ кл.}} \cdot \\ & \left(\left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}+\Delta\tau}^{\tau_{4i+4}+\Delta\tau} V'_B(x) dx \right) + \left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+4}+\Delta\tau}^{\tau_{4i+5}+\Delta\tau} V''_B(x) dx \right) \right) + k_{3 \text{ кл.}} \cdot \\ & \left(\left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}+2\Delta\tau}^{\tau_{4i+4}+2\Delta\tau} V'_B(x) dx \right) + \left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+4}+2\Delta\tau}^{\tau_{4i+5}+2\Delta\tau} V''_B(x) dx \right) \right) + \dots + k_{p \text{ кл.}} \cdot \\ & \left(\left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+1}+(p-1)\Delta\tau}^{\tau_{4i+4}+(p-1)\Delta\tau} V'_B(x) dx \right) + \left(\sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau_{4i+4}+(p-1)\Delta\tau}^{\tau_{4i+5}+(p-1)\Delta\tau} V''_B(x) dx \right) \right) \end{aligned}$$

Аналіз формул показує, що процес теплообміну між генераторним газом і повітрям, представляє невстановлений (перехідний) циклічний коливальний процес. В якому суттєву роль відіграє одиничний період функціонування повітряного електромагнітного клапана (клапан відкритий + клапан закритий) на тимчасовому інтервалі $\tau_1 - \tau_5$ (Рис.). Для отримання коректних розрахункових значень теплової енергії набутої повітрям (кВт/год) при русі по індивідуальній повітряній трубці необхідно враховувати не тільки час відкритого стану клапана,

але і час його закритого стану, оскільки процес теплопередачі відбувається в обох випадках, але з різними об'ємами повітря.

Нагрів повітря в індивідуальній повітряній трубці призводить до зміни його фізичних параметрів: щільності - ($\text{кг}/\text{м}^3$), об'єму - (м^3), що впливає на швидкість закінчення повітря з дутьової фурми. Швидкість витікання повітря з дутьової фурми ($\text{м}/\text{с}$), може бути визначена за формулою:

$$v = \frac{0,85 \cdot V_{\text{вф}}}{a \cdot (\alpha x R_0 + 0,29 R_0^2)} \quad (3.17)$$

Так як при нагріванні повітря збільшує свій об'єм, то співвідношення обсягів холодного та нагрітого повітря можна виразити через коефіцієнт зміни об'єму:

$$k_{\text{об}} = \frac{V_{\text{вф}}}{V_{\text{в}}} \quad (3.18)$$

З урахуванням формул і поправочного коефіцієнта - характеризує індивідуальні особливості повітряного електромагнітного клапана управління, швидкість витікання повітря з фурми дуття необхідно записати в наступному вигляді:

$$v = \frac{0,85 \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{р кл}} \cdot \int_{T_1}^{T_4} V_{\text{в.ст.}}(x) dx}{a \cdot (\alpha x R_0 + 0,29 R_0^2)} \quad (3.19)$$

Аналіз формули дозволяє дійти невтішного висновку, що швидкість, отже й далекобійність струменя повітря з дутьової фурми прямо пропорційна подынтегральному вираженню об'ємного витрати повітря, у функції часу і обернено пропорційна діаметру фурми. Отримані математичні залежності до розрахунку витрати повітря при параметричному управлінні дутьевими фурмами газогенератора, розрахунку теплової енергії на нагрівання повітря, швидкості закінчення повітря з дутьової фурми не враховують коефіцієнт опору шару палива в реакційної зоні газогенератора. Даний параметр може бути визначений тільки експериментальним шляхом, так як фізикомеханічні властивості твердого палива, що йде на газифікацію, можуть мати істотні

відмінності (фракційний склад, адгезивні властивості і т.д.), внаслідок чого опір реакційної зони газогенератора також буде змінюватися.

Слід зазначити, що система параметричного управління повітрям в газогенераторі за рахунок варіювання часу циклу роботи та паузи в роботі електромагнітного повітряного клапана вимагає використання не тільки апаратних, але й програмних засобів, що зрештою призводить до використання в системі керування електронного модуля (контролера).

Як приклад нижче проведемо розрахунок основних конструктивно-технологічних параметрів газогенератора з параметричним регулюванням робочого процесу в площині фурменного пояса, для спільної роботи з трьома різними електростанціями, ДВЗ яких будуть виступати споживачами генераторного газу.

Розрахунки виконаємо за формулами, використаними в аналітичному огляді для обґрунтування способу керування газогенераторною установкою. Виконання розрахунків спрощується через те, що ДВС електростанції працює в одному діапазоні частот обертання колінчастого валу, при різних режимах завантаження електрогенератора. Частота обертання колінчастого валу ДВЗ визначається і підтримується однорежимним регулятором відцентрового типу, в межах $3000 \pm \Delta \text{ хв}^{-1}$. Конструктивно - технологічні розрахунки основних параметрів газогенератора виконані з умови забезпечення генераторним газом найпотужнішого споживача - двигуна 4Ч 8,2/7,1. Для розрахунку швидкості повітряного дуття з фурми газогенератора (м/с), конструктивно поставимо кількість дутьових фурм $k=6$ шт. при робочому діаметрі фурми $d_f = 8$ мм.

У дослідженнях Токарева Г.Г. для поліпшення динамічних характеристик ДВЗ, що працюють разом із газогенератором зверненого процесу, рекомендується швидкість дуття з фурми приймати в межах 20...30 м/с. У дослідженнях Юдушкіна Н.Г. рекомендована швидкість дуття з фурми становить 14 ... 16 м / с. У дослідженнях Мезіна І.С. відзначається, що збільшення швидкості дуття з фурми вище оптимальних значень призводить до збільшення

опору газогенераторної установки та погіршує динамічні характеристики ДВЗ. А зниження швидкості дуття з фурми нижче оптимальних значень призводить до погіршення якості генераторного газу і збільшення кількості смол нім.

Розрахункові дані за швидкістю повітряного дуття з фурми, показують, що при конструктивно заданих параметрах газогенератора (кількості дутьових фурм $k=6$ шт. і робочому діаметрі фурми $d=8$ мм.) в швидкісний діапазон, що рекомендується, укладається тільки газогенератор при сумісній експлуатації з ДВС 4Ч 8,2/7,1. Спільна робота газогенератора з ДВС 1Ч 6,8/5,4 та ДВС 2Ч 7,2/6,0 не вкладається в рекомендовані швидкісні діапазони закінчення повітря з дутьових фурм газогенератора.

Збільшення швидкості повітряного дуття з фурми до рекомендованих значень може бути реалізовано внесенням змін у конструкцію газогенератора шляхом заміни дутьових фурм з робочим діаметром $d_{\phi}=8$ мм на фурми з меншим робочим діаметром. Або «глушіння» частини дутьових фурм із робочим діаметром $d_{\phi}=8$ мм заглушками. Обидва варіанти адаптації газогенератора до роботи зі споживачем генераторного газу, має характер споживання відмінний від розрахункового, є досить трудомісткими.

Використання для переналаштування режимів роботи газогенератора розробленої конструктивно-технологічної схеми, розглянутої в розділі Вище, дозволяє мінімізувати невиробничі витрати. Завдання збільшення швидкості повітряного дуття з фурми, за допомогою параметричного управління газогенератором, вирішується застосуванням статичного або динамічного режиму управління повітряними електромагнітними клапанами дутьових фурм.

Наприклад, збільшення швидкості повітряного дуття з фурми, під час роботи газогенератора з ДВС 2Ч 7,2/6,0 з 9,74 м/с до 19,48 м/с можна застосувати статичний режим управління. При цьому в роботі на постійній основі буде задіяно лише три дутьові фурми, з шести. Для збільшення швидкості повітряного дуття до 30 м/с, краще використовувати динамічний асинхронний режим управління. У роботі будуть задіяні всі шість дутьових фурм, але

одночасно будуть включені лише дві з них. Коефіцієнт регулювання часу закритого стану електромагнітного клапана управління дутьової фурми, на час відкритого стану (тобто шпаруватість), у цьому випадку складе - 0,3.

Висновки по розділу

Аналіз науково-технічної літератури з газогенераторної тематики дозволяє дійти невтішного висновку, що швидкість закінчення повітря з дутьової фурми газогенератора є змінною величиною у процесі роботи газогенераторної установки, у своїй вона істотно впливає якісний склад генераторного газу та динамічні характеристики ДВЗ.

Слід зазначити, що система параметричного управління повітрям у газогенераторі за рахунок варіювання часу циклу роботи та паузи в роботі електромагнітного повітряного клапана, вимагає використання не тільки апаратних, а й програмних засобів, що в кінцевому підсумку призводить до використання в системі управління електронного модуля (контролер).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблено конструктивно - технологічна схема газогенераторної установки що включає в себе газогенератор з параметричним регулювання процесу газифікації в площині фурменного пояса, систему очищення та охолодження генераторного газу, систему параметричного управління подачею окислювача в реакційну зону газогенератора, споживача генераторного газу.

Отримано залежність для розрахунку швидкості витікання повітря з дутьової фурми, що враховує як варіативність витрати повітря, так і теплообміну між генераторним газом та повітрям, обумовлених режимами функціонування повітряного електромагнітного клапана управління.

Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів дозволила визначити, що застосування динамічного асинхронного режиму керування газогенератором дозволяє адаптувати газогенераторну установку до роботи на різних видах твердого палива та налаштовувати різні витрати генераторного газу споживачем.

Порівняльний аналіз функціонування ДВЗ електростанцій і теплогенератора на традиційних видах палив, та генераторному газі виробленому в розробленій газогенераторній установці, з сільськогосподарських та промислових відходів, показує суттєве зниження матеріальних витрат на паливо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Офіційний сайт Біоенергетичної асоціації України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.uabio.org>
2. Офіційний сайт компанії «Зорг Биогаз АГ» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.zorg.ua>
3. Офіційний сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sae.gov.ua>
4. Ключ С.В. Визначення основних показників та ефективності часткової газифікації біомаси в газогенераторі щільного шару з оберненим дугтям / С.В. Ключ, М.М. Жовмір, З.В. Маслюкова, В.П. Демчина // Відновлювана енергетика. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2016. – № 2. – С. 79 – 87
5. Куріс Ю.В. Економічні аспекти виробництва та застосування біогазу. Газ метантенків / Ю.В. Куріс, С.І. Ткаченко, Н.В. Семененко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – №7. – С. 23 – 30.
6. Четверик Г.О. Екологічні аспекти виробництва біогазу в Україні / Г.О. Четверик, В.М. Лісничий // Міжнародна конференція "Зелена енергетика", тези доповідей. – К.: Національний авіаційний університет, 2013 р. – С. 386 – 388.
7. Четверик Г.О. Виробництво та споживання біогазу в Україні / Г.О. Четверик // Міжнародна конференція "Відновлювана енергетика XXI століття", тези доповідей. – смт. Миколаївка, 2011 р. – С. 432 – 434.
8. Блюм Я.М. Новітні технології біоенергоконверсії / Я.М. Блюм, Г.Г. Гелетуша, І.П. Григорчук та ін. – К.: Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.

9. Ключ С. В. Визначення частки соломи та рослинних відходів для енергетичного використання // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4 (36), – С. 82–85.

10. Ключ С. В. Оцінка енергоефективності вирощування зернових культур для виробництва біопалива/ С. В. Ключ // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 12–15.

11. Створення сучасного газогенераторного двигуна внутрішнього згоряння для північних районів України – важливий фактор підтримки с.-г. товаровиробника / Шмалюк М. І., Вознюков В. А., Ємець Б. В., Лось Л. В. Вісник Інженерної академії України. 2001. № 2. С. 75–77.

12. Ємець Б. В. Покращення показників техніко-експлуатаційних властивостей транспортних засобів з газогенераторними установками: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.02. Житомир, 2008. 189 с.

13. Цивенкова Н. М., Самилін О. О. Перспективи конструктивного розвитку автомобільних газогенераторних установок в історичному аспекті їх створення. Вісник ДАУ. 2005. № 2. С. 307–326

14. Криворот А. І., Філіпова Г. А. Визначення коефіцієнта EROI для виробництва генераторного газу. Тези 65-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. 22 квітня – 15 травня 2013 р. ПолтНТУ, Полтава, 2013. Т. 4. С. 56–58

15. Способи поліпшення індикаторних та ефективних показників двигуна ЗМЗ-4063 при роботі на генераторному газі / Філіпова Г. А., Орисенко О. В., Криворот А. І., Голуб О. М., Капуста О. О. Наукові нотатки: міжвузівський збірник. Луцьк: ЛНТУ, 2014. Вип. 45. С. 573–577.

16. Міненко С. В., **Макарчук М. П.** Огляд конструкцій газогенераторів і способів керування ними. *Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики.* 19 квітня 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. Т. 3. С. 74-77.

17. Міненко С. В., **Макарчук М. П.** Розробка конструктивно-технологічної схеми газогенераторної установки. *Збірник матеріалів ІХ Міжнародної науково-практичної конференції „Інноваційні технології в АПК”*. 7-8 червня 2023 року, м. Луцьк. С.