

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

ЗАКЛІНСЬКИЙ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.785.013:533.27 (043.3)

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КРИТИЧНИХ ОТВОРІВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ
ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ У ПРОЦЕСАХ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ

05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки
13 – Механічна інженерія

Автореферат дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук

Харків – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Планковський Сергій Ігорович,
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
директор Навчально-наукового інституту
енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Добротворський Сергій Семенович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри технології
машинобудування та металорізальних
верстатів

кандидат технічних наук
Торба Юрій Іванович,
державне підприємство «Запорізьке
машинобудівне конструкторське бюро
«Прогрес» імені академіка О. Г. Івченка,
заступник директора підприємства з
наукової роботи – начальник комплексу
експериментально-випробувального

Захист відбудеться «21» червня 2024 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.04 в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

Автореферат розіслано «14» травня 2024 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради



Ю. О. Сисоєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасному виробництві та технологічних процесах широко використовуються газові суміші з різноманітним складом. Це стосується таких галузей, як метрологічне забезпечення виробничих процесів, зварювальні роботи, вакуумно-плазмові технології, лазерні технології, термоімпульсна обробка, де вимоги до точності та стабільності складу газових сумішей надзвичайно високі.

Складність досягнення зазначених високих вимог зумовлено не лише багатокомпонентністю суміші, але й необхідністю досягнення її гомогенності та гарантованого співвідношення газових компонентів у суміші з похибкою менше відсотка. Це особливо критично в контексті технологічних процесів, де навіть невеликі відхилення складу суміші від заданого можуть впливати на якість та результативність обробки матеріалів чи протікання виробничого циклу.

У контексті нових матеріалів виникає необхідність розробки інноваційних стратегій для поліпшення якості зварювальних швів. Зважаючи на різноманіття хімічних властивостей газів, величини їх концентрації можуть виявити значний вплив на процес зварювання. Наприклад, при використанні методу зварювання MAG (електродугове зварювання в активному захисному газі) кількість бризок суттєво залежить від концентрації компонентів у застосованій газовій суміші. Наприклад, при 10 % CO_2 в газовій суміші Ar-CO_2 в процесі зварювання конструкційної сталі SM490A (аналог 17ГС) утворюються бризки загальною масою 0,3 г за хвилину, а при збільшенні вмісту CO_2 до 30 % – 0,5 г/хв.

В іонно-плазмових технологіях важливим є вибір оптимального складу газової суміші, оскільки це визначально впливає на досягнення бажаного результату й оптимізацію ефективності процесу. Концентрація різних газів у складі суміші істотно впливає на параметри іонно-плазмової обробки. Зокрема, при іонно-плазмовому нанесенні покриттів кількість азоту в камері визначає його кількість в отриманому шарі.

Для прецизійної термоімпульсної обробки навіть мінімальні зміни в усередненому питомому тепловому потоці, які зумовлені похибками в компонентному складі суміші, впливають на точність радіуса заокруглення крайок оброблюваної деталі.

Однією з основних переваг використання методу отворів із критичним перерізом є його здатність створювати складні багатокомпонентні газові суміші, подібні до двокомпонентних, за допомогою відповідної кількості отворів. Цей метод відкриває можливість для виробництва великих обсягів газових сумішей. У такому методі витрати можуть різнитися в значному діапазоні, від декількох мілілітрів до десятків літрів на хвилину, що робить його надзвичайно гнучким та ефективним в індустріальних застосуваннях.

Метод отворів із критичним перерізом виступає як один з найбільш точних серед динамічних засобів формування газових сумішей. Цей метод не лише забезпечує найвищу продуктивність у генерації сумішей у широкому діапазоні концентрацій, але й виявляє невеликі відхилення в співвідношенні компонентів. У його базовому варіанті похибка дозування компонентів становить – 0,5 %.

Водночас перспективні процеси фізико-технічної обробки потребують застосування газових сумішей з похибкою дозування компонентів – до 0,1 %. Тому підвищення точності методів генерації газових сумішей є актуальним завданням.

У зв'язку з вищезазначеним, розробка високоефективних газозмішуючих систем, які забезпечують не лише високу точність вмісту кожного компонента в складній газовій суміші, але й стабільність її складу у виробничих умовах, у сучасному світі є необхідною передумовою для забезпечення високих стандартів якості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертації покладено матеріали, що узагальнюють дослідження, виконані автором при реалізації держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України: «Розробка автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0117U002500); «Розробка технологій та технічних рішень для автоматизованих промислових установок прецизійної обробки деталей агрегатів ГТД детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0119U100943); «Розробка програмного та технічного забезпечення цифрових близнюків процесів обробки деталей літальних апаратів детонуючими газовими сумішами» (№ ДР 0102U109601).

Мета дослідження. Розробка методу генерації газових сумішей для процесів фізико-технічної обробки з підвищеною точністю дозування компонентів на основі динамічного методу отворів із критичним перерізом.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити такі **завдання**: розробити удосконалену схему динамічного методу отворів із критичним перерізом, яка підвищить точність складу газових сумішей; розробити математичну модель для визначення технологічних параметрів при застосуванні запропонованого методу та провести аналіз можливості застосування прийнятих технічних рішень; розробити методики для визначення характеристик системи генерації газових сумішей на основі запропонованого методу, які б забезпечували заданий рівень точності компонентного складу суміші; розробити прецизійний генератор газових сумішей на основі запропонованих технічних рішень.

Об'єкт дослідження: процес генерації газової суміші для фізико-технічної обробки.

Предмет дослідження: математичне моделювання процесів генерації газових сумішей методом отворів із критичним перерізом та реалізація прийнятих технічних рішень.

Методи дослідження: теоретичні – математичне моделювання генерації газової суміші та її газодинамічної течії; експериментальні – натурний експеримент контролю наповнення газом робочої та проміжної посудин.

Досліджування виконувались на експериментальному стенді генерації газових сумішей у лабораторних умовах з використанням сучасної контрольно-вимірювальної апаратури. Фактичні форми і розміри отворів у соплах визначалося з використанням інструментального мікроскопа із цифровою шкалою БМІ-1Ц. Для тарування датчиків тиску використовувався вантажопоршневий манометр класу точності 0,05.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому.

1. Удосконалено динамічний метод отворів із критичним перерізом для генерації багатокомпонентних газових сумішей, що використовуються в процесах фізико-технічної обробки та полягає в подачі компонентів з посудин, що передбачають регулювання об'єму згідно з виконанням умови забезпечення рівності температур газів у посудинах під час їхнього перетікання, що дозволяє забезпечити похибку дозування компонентів паливної суміші на рівні до 0,1 % за масою.

2. Уперше розроблено математичну модель для визначення об'ємів та початкового тиску в посудинах з компонентами газової суміші для удосконаленого методу отворів із критичним перерізом, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонентів у робочій посудині із сумішшю без використання додаткового регулювання.

3. Уперше запропоновано метод швидкісного визначення об'єму посудини довільної форми, що включає заповнення вимірюваної посудини газом та його дренажу при надкритичному витіканні із сопла, для якого попередньо визначено коефіцієнт витрати, з багаторазовим вимірюванням тиску в посудині, яке проводять у діапазоні від 0,5 до 1 секунди.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено систему генерації багатокомпонентної газової суміші для процесів фізико-технічної обробки на базі вдосконаленого методу отворів із критичним перерізом, у якому компоненти суміші подають із попередньо наповнених до початкового тиску проміжних посудин, що передбачають регулювання об'єму. Ця система дає змогу отримувати газові суміші з відхиленням складу на рівні до 0,1 % за масою.

2. Розроблено методику визначення характеристик системи генерації багатокомпонентної газової суміші, яка дозволяє отримати необхідні параметри для формулювання закону керування виконавчими елементами, що забезпечує необхідну точність дозування компонентів.

3. Запропоновано спосіб визначення об'єму посудини довільної форми, що може бути застосований для широкого кола задач, у яких використовується наповнення вимірюваних посудин газом з тиском, що забезпечує надкритичне витікання газу в атмосферу.

Результати роботи впроваджено на ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар», ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» та використано в навчальному процесі кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», про що отримані відповідні акти. На запропонований спосіб генерації газової суміші отримано патент на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження виконано самостійно: обґрунтовано загальну концепцію роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, обрано підходи для вирішення поставлених завдань.

У працях, написаних у співавторстві, авторові належить таке: розробка генератора паливної суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення,

принципи сумішоутворення при прецизійному термоімпульсному обробленні, алгоритм керування системою генерації суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення, схема й опис роботи розробленого генератора паливної суміші, спосіб приготування газової суміші заданого складу [1, 10]; спосіб зменшення непродуктивних витрат газу при попередній підготовці посудини [22]; огляд методів генерації газової суміші з високоточним співвідношенням компонентів, їх особливостей, переваг і недоліків стосовно термоімпульсного обладнання, обґрунтування застосування найбільш перспективного методу отворів із критичним перерізом [2, 11, 12]; алгоритм керування генерацією суміші для прецизійної термоімпульсної обробки, методика вибору діаметрів отворів із критичним перерізом, об'ємів проміжних посудин та початкового тиску в них та тривалості наповнення робочої камери термоімпульсного устаткування [3]; спосіб швидкісного вимірювання об'єму посудин складної форми, що заснований на заповненні вимірюваної посудини газом та його дренажуванні за надкритичного витікання із сопла з динамічним вимірюванням тиску у вимірюваній посудині, з використанням каліброваного сопла за допомогою еталонної посудини [4, 17, 21]; метод визначення об'єму посудини через зміну її об'єму з'єднанням з еталонною посудиною, у якому вимірюють тиск та температуру після встановлення їх сталого співвідношення [20]; спосіб визначення фактичної площини критичного перерізу отвору сопла, розроблено змішувач системи сумішоутворення й дана оцінка технічним рішенням щодо його конструкції, математична модель процесу генерації гомогенної газової суміші із заданим компонентним складом, дослідження перетікання компонентів газової суміші через змішувач [5, 13, 15]; проведено серію натурних експериментів з наповнення резервуару з високочастотним моніторингом тиску й температури наповнюваного газу, визначено вплив урахування теплообміну зі стінками резервуару на досліджувані параметри суміші, а саме; тиск, осереднену за об'ємом температуру газу, температуру в контрольній точці, масу компонента суміші [6, 18]; визначені особливості роботи генератора паливної суміші за методом отворів із критичним перерізом й наведені відповідні визначальні рівняння дозування компонент газовой суміші й часу наповнення резервуару для побудови системи керування з використанням цифрового близнюка процесу, проаналізовано існуючі методи й засоби побудови цифрових близнюків аналогічних досліджуваній системі [7, 14, 19]; аналітична модель методу генерації газової суміші на основі надкритичного витікання газів з посудин через калібровані отвори, запропоновано виконувати корекцію початкового тиску в посудинах [8]; аналіз існуючих методів й засобів побудови цифрових близнюків, визначені напрями досліджень [9, 16].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися автором на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях: всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні», (м. Харків, 2016 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки», (м. Харків, 2017 – 2020 рр.); міжнародна науково-технічна конференція «Нові технології в машинобудуванні», (с. Коблеве,

м. Харків, 2019 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering» (ICTM 2020), (м. Харків, 2020 р.); міжнародна конференція з передового машинобудування та енергетики «Advances in Mechanical and Power Engineering» (CAMPE 2021), (м. Харків, 2021 р.); міжнародна науково-практична конференція «Mathematical Modeling and Simulation of Systems» (MODS'2022), (м. Харків, 2022 р.).

Публікації. Основні результати за темою дисертації викладено в 22 публікаціях з яких 1 розділ у монографії, 7 статей у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави із напрямку з якого підготовлено дисертацію, 1 патент на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу, 9 публікацій у матеріалах міжнародних наукових конференцій, 3 патенти на корисну модель, які додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 184 сторінки, з яких основного тексту 141 сторінка, у тому числі: 73 рисунки, 13 таблиць, список використаних джерел із 97 найменувань на 14 сторінках, додатки на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

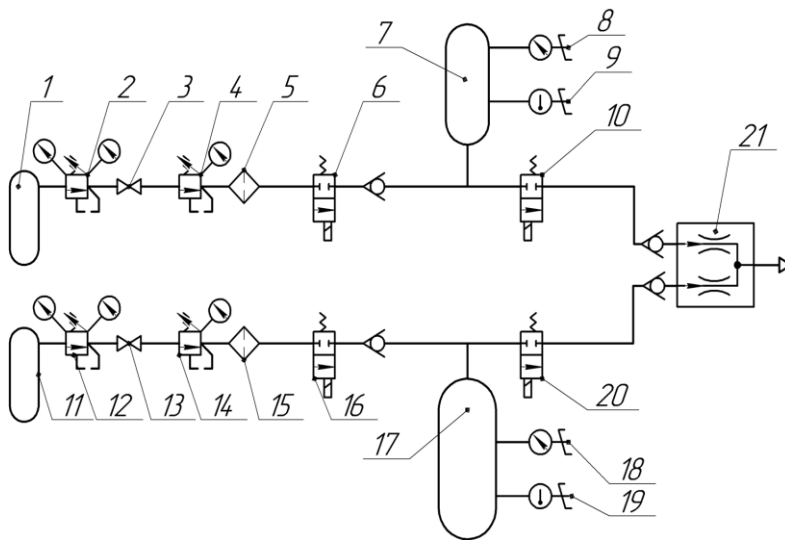
У вступі обґрунтовано актуальність теми й наведено загальну характеристику роботи, показано наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів дослідження.

У першому розділі проведено оглядовий аналіз використання багатокомпонентних газових сумішей у сучасних технологіях фізико-технічної обробки та вплив концентрації компонентів суміші на властивості оброблюваних матеріалів та стабільність технологічних режимів обробки. Проаналізовані сучасні промислові методи генерації газових сумішей, при цьому визначено, що вони неповною мірою відповідають потребам перспективних процесів фізико-технічної обробки і потребують удосконалення як з точки зору точності дозування компонентів, так і з точки зору їх продуктивності. Для використання найперспективнішого методу отворів із критичним перерізом у таких процесах його точність має бути підвищена до показників похибки дозування компонент принаймні до рівня 0,1 %. При цьому важливо враховувати ряд факторів, які не можуть бути точно задані заздалегідь, але впливають на похибку дозування компонентів. Для їх визначення необхідна розробка теоретичних методів та експериментальних методик, які б забезпечували заданий рівень точності компонентного складу газової суміші. Для вирішення цих проблем у розділі сформульовано мету й завдання дослідження.

Основні наукові результати, наведені в першому розділі, опубліковано в працях автора [1, 2, 11, 12].

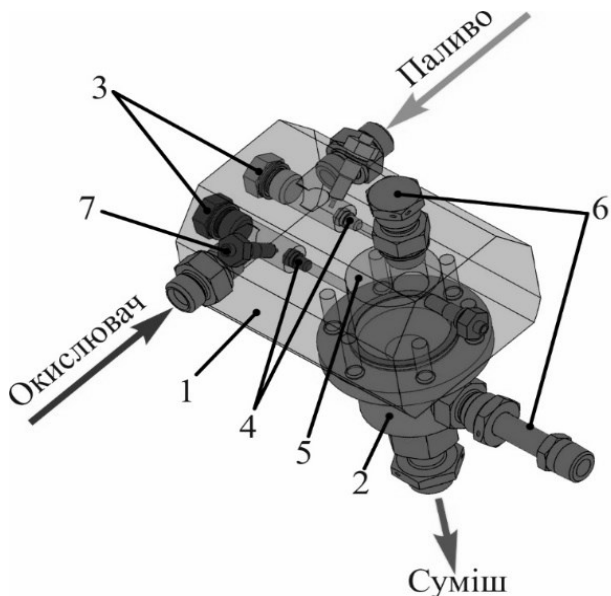
У другому розділі описано вдосконалений динамічний метод отворів із критичним перерізом для генерації газових сумішей через упровадження в лінії подачі газів проміжних посудин, як показано на рис. 1.

У зазначеному підході після наповнення посудин та досягнення заданого рівня тиску подача до них припиняється. Фактично, процес генерації суміші



1, 11 – балони з газами;
 2, 4, 12, 14 – редуктори; 3, 13 – вентилі;
 5, 15 – фільтри; 7, 17 – проміжні посудини;
 6, 10, 16, 20 – електромагнітні клапани;
 8, 18 – датчики вимірювання тиску;
 9, 19 – датчики вимірювання температури;
 21 – отвори з критичним перерізом у змішувачі

Рисунок 1 – Схема пристрою для приготування бінарних сумішей удосконаленим методом отворів із критичним перерізом



1 – корпус; 2 – кришка; 3 – корки;
 4 – сопла; 5 – камера змішувача;
 6 – штуцери; 7 – датчики

Рисунок 2 – Модель змішувача

відбувається лише після того, як клапани 10 та 20 відкриваються, дозволяючи газам вільно змішуватися в змішувачі з отворів із критичним перерізом 21. Під час цього процесу газу безперешкодно переміщуються з посудин 7 та 17 без застосування додаткових регулювальних пристроїв. Забезпечення точності дозування компонентів у суміші досягається через вибір площин критичних отворів, об'ємів проміжних посудин і початкових тисків та температур у них.

Конструкція змішувача (модель наведено на рис. 2) складається з корпусу 1, кришки з вихідними отворами 2, технологічних корків 3. Змішувач розроблений з урахуванням реалізації концепції подачі компонентів газової суміші крізь спеціальні сопла 4 та з подальшим змішуванням суміші (забезпечення гомогенності) за допомогою зустрічних потоків у камері 5. Використання сопел 4 з різними площинами критичного перерізу отворів для окиснювача й палива відповідно при надкритичному перетіканні з постійним тиском забезпечує задане, стехіометричне, співвідношення компонентів суміші.

Розроблено аналітичну модель сумішоутворення для термоімпульсного оброблення із застосуванням удосконаленого методу для формування двокомпонентної суміші співвідношення масових концентрацій компонентів якої дорівнює $\beta = c_1/c_2$ У якій використовуються певні припущення та моделі: квазістаціонарність перетікання,

що означає, що параметри газу можуть змінюватися в часі, але вони вважаються однаковими по всьому об'єму кожної з посудин; адіабатичність перетікання, тобто процес перетікання газу відбувається без теплових обмінів з оточуючим середовищем; застосування моделі досконалого газу.

Для визначення параметрів газів у проміжних посудинах використано перший закон термодинаміки

$$dQ = dU + dL \quad (1)$$

де Q – кількість теплоти; U – внутрішня енергія газу; L – енергія витрачена на виконання роботи.

Для посудини, яка має постійний об'єм $dL = 0$, а за адіабатичного витікання втрата тепла пов'язана лише з його виведенням разом з газом, який витікає:

$$dQ = -G i dt \quad (2)$$

де G – масова витрата газу; i – ентальпія.

Змінення внутрішньої енергії газу із застосуванням рівняння стану ідеального газу можна записати у вигляді:

$$dU = d(C_V m T) = C_V \frac{V}{R} \cdot dP = \frac{V}{k-1} \cdot dP \quad (3)$$

де V – об'єм посудини; k – показник адіабати відповідного компонента суміші газів, C_V – теплоємність при постійному об'ємі, R – універсальна газова стала.

З (1) і (3) витікає, що

$$dP = -((k-1)/V) \cdot G \cdot C_P \cdot T \cdot dt \quad (4)$$

Миттєве значення масової витрати при надкритичному перепаді тисків через критичний отвір встановлюється формулою:

$$G = \frac{\mu F P}{\sqrt{RT}} \psi, \quad (5)$$

де $\psi = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$; F - площа критичного перерізу отвору; μ - коефіцієнт витрати; k – показник адіабати газу.

Поточні значення тиску і температури в посудині (5) визначаються як:

$$P = P_0 (1 + Bt)^{\frac{-2k}{k-1}}, \quad (6)$$

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (7)$$

де $B = \frac{(k-1)F\sqrt{RT_0}}{2V} \psi$; P_0, T_0 – початкові тиск та температура в проміжній посудині; V – об'єм проміжної посудини; k – коефіцієнт адіабати газу, який перетікає через отвір з критичним перерізом;

Співвідношення площин критичних перерізів отворів 1 і 2:

$$F_1 = \beta \cdot F_2 \frac{\mu_2 \sqrt{M_2} \psi_2}{\mu_1 \sqrt{M_1} \psi_1}, \quad (8)$$

де M_1, M_2 – молярні маси компонентів газової суміші.

Співвідношення об'ємів посудин 1 і 2 задається виразом

$$V_1 = \beta \cdot V_2 \frac{\mu_2 M_2 k_1 - 1}{\mu_1 M_1 k_2 - 1}. \quad (9)$$

Якщо суміш утворюють гази з рівними або близькими показниками адіабати (наприклад, N_2+H_2 , N_2+O_2 , $Ar+He$ тощо), при $P_{10} = P_{20} = P_0$ задання площин критичних перерізів отворів, виходячи з виразу (8), а об'єми проміжних посудин з виразу (5) забезпечує не тільки рівність поточних температур, а й практичну рівність поточних тисків. Виходячи з виразу (5), при цьому автоматично забезпечується і задане співвідношення масових витрат без застосування будь-яких регулювальних пристроїв.

У разі необхідності утворення суміші з газів з відмінними показниками адіабати (Cl_2+N_2 , CH_4+Ar , CH_4+N_2 та ін.), при виконанні умов (8) і (9) тиск у посудинах газів при витіканні буде змінюватися по-різному. Однак якщо відмовитися від вимоги забезпечення сталості співвідношення миттєвих масових витрат компонентів, то в цьому випадку можна досягти точності забезпечення заданої масової концентрації газів у суміші за рахунок завдання початкових тисків у посудинах, виходячи з виразу:

$$\left(\int_0^{\tau} G_1 dt \right) / \left(\int_0^{\tau} G_2 dt \right) = \beta, \quad (10)$$

де τ - час наповнення камери сумішшю.

Для корекції початкового тиску в посудині, яка дозволяє досить точно визначити співвідношення масових концентрацій компонентів, після підстановки в (10) виразів (5)-(8) отримуємо:

$$\frac{P_{01}}{P_{02}} = \frac{\int_0^{\tau} (1 + B_2 t)^{-\frac{k_2+1}{k_2-1}} dt}{\int_0^{\tau} (1 + B_1 t)^{-\frac{k_1+1}{k_1-1}} dt}. \quad (11)$$

Час наповнення робочої камери термоімпульсної установки газовою сумішшю розраховується як час, за який маса одного з компонентів, поданих у робочу камеру стане заданою. За прийнятих припущень, це призводить до наступної залежності:

$$m_2 = \int_0^{\tau} G_2 dt, \quad (12)$$

яка, після підстановки в неї виразів (6), (7) та інтегрування, дає визначення величини τ в (11) вираз:

$$\tau = \frac{1}{B_2} \left(\left(\frac{A_2}{A_2 - C_2} \right)^{\frac{k_2-1}{2}} - 1 \right), \quad (13)$$

де $A_2 = \mu_2 F_2 \psi_2 P_{02} (k_2 - 1)$ і $C_2 = 2m_2 B_2 \sqrt{R_2 T_0}$.

Для встановлення закону зміни тиску використано рівність ентальпій струменів, які витікають з посудин та струменів, які втікають у робочу камеру, що призводить до залежності зміни тиску в робочій камері від часу наповнення:

$$P_K = P_{01} \frac{V_1}{V_K - V_D} \left[1 - (1 + t \cdot B_1)^{\frac{-2k_1}{k_1-1}} \right] + P_{02} \frac{V_2}{V_K - V_D} \left[1 - (1 + t \cdot B_2)^{\frac{-2k_2}{k_2-1}} \right] + P_{K0}, \quad (14)$$

де V_D – сумарний об'єм деталей та пристроїв у робочій камері; P_{K0} – початковий тиск у камері (зазвичай дорівнює атмосферному).

Для правильної роботи системи генерації суміші необхідне забезпечення надкритичного перепаду тиску між посудинами та камерою протягом усього часу наповнення, яке також залежить від показника адіабати газу:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &> P_K \cdot \left(\frac{2}{k_1 + 1} \right)^{-k_1/(k_1-1)} \\ P_2 &> P_K \cdot \left(\frac{2}{k_2 + 1} \right)^{-k_2/(k_2-1)} \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Для визначення температури в робочій камері застосовуватимемо рівняння стану досконалого газу:

$$T_K = \frac{P_K}{\rho_{\text{сум}} R_{\text{сум}}}, \quad (16)$$

де $\rho_{\text{сум}}$, $R_{\text{сум}}$ – щільність і постійна газова суміші, що визначаються за поточною масовою концентрацією компонентів виразами:

$$1/\rho_{\text{сум}} = c_1/\rho_1 + c_2/\rho_2, \quad (17)$$

$$R_{\text{сум}} = c_1 R_1 + c_2 R_2. \quad (18)$$

Коефіцієнти витрати отворів із критичним перерізом, що входять у вирази (6), (8) і (13), є відношенням реальної масової витрати через критичний отвір до його досконалого значення і враховують стиснення струменя при закінченні і втрати на опір тертя.

Для перевірки заданої моделі проведено числове моделювання зазначеного методу.

На рис. 3 наведено графіки зміни тиску в проміжних посудинах метану та кисню за часом наповнення камери. Різниця температур у проміжних посудинах протягом заповнення не перевищує 0,002 К.

На рис. 4 наведено графік залежності тиску в робочій камері часу наповнення сумішшю, отриманий з використанням виразу (14). На момент закінчення наповнення перепад тиску між посудиною кисню та камерою $P/P_K = 2,163$ (при критичному перепаді 1,893), а посудиною метану та камерою $P/P_K = 2,13$ (при критичному перепаді 1,844). Отже, умови (15) виконуються.

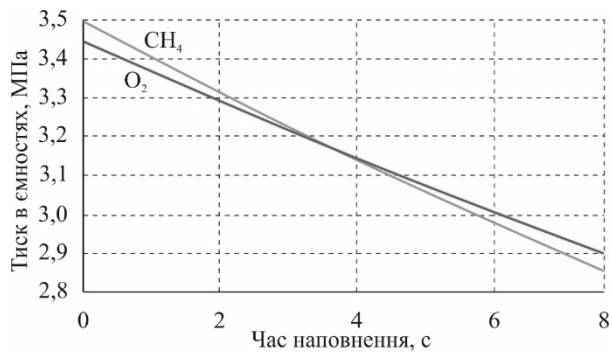


Рисунок 3 – Залежність тиску в проміжних посудинах від часу наповнення робочої камери

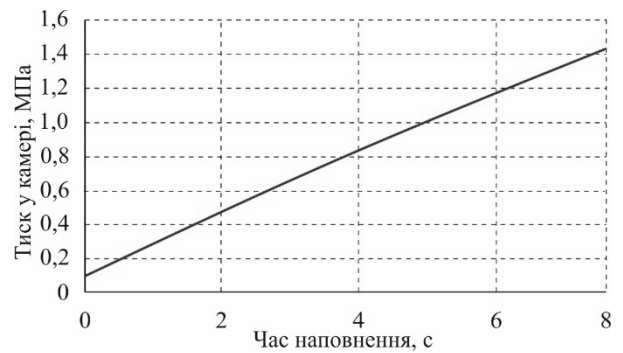


Рисунок 4 – Залежність тиску в робочій камері від часу наповнення

На рис. 5 наведено графіки зміни миттєвого співвідношення масової витрати компонентів паливної суміші $\beta^* = G_{O_2} / G_{CH_4}$ за часом заповнення камери, для заданого співвідношення масових концентрацій стехіометричної суміші ($\beta = 4$) та отриманої після закінчення наповнення величини даного співвідношення $\beta_{сер}$. У результаті теоретична похибка забезпечення співвідношення масових концентрацій компонентів паливної суміші склала менше 0,01 %.

На рис. 6 наведено графік зміни температури паливної суміші в камері за часом наповнення. За рахунок стиснення суміші кінцева температура перевищує початкову більш ніж на 80° .

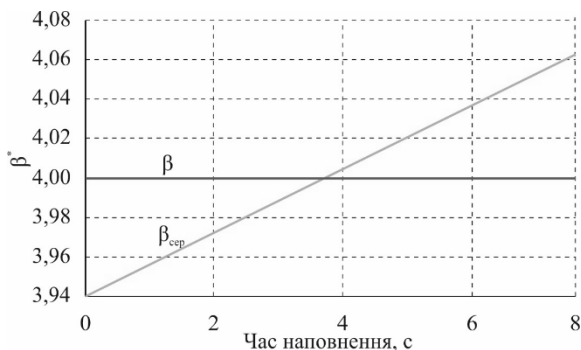


Рисунок 5 – Залежність миттєвого співвідношення масової витрати компонентів газової суміші від часу наповнення

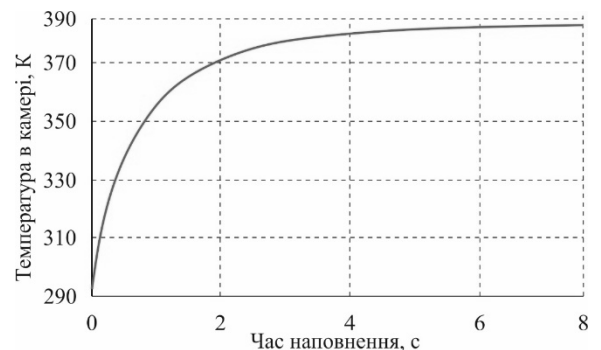


Рисунок 6 – Залежність температури в робочій камері від часу наповнення

Таким чином, вибір параметрів системи генерації суміші за залежностями (5) – (18) дозволяє забезпечити необхідну для прецизійної термоімпульсної обробки точність дозування компонентів з використанням запропонованої модифікації методу отворів із критичним перерізом.

Розроблено числові моделі складових частин удосконаленої системи генерації газових сумішей: наповнення проміжних посудин, перетікання компонентів газової суміші через отвори із критичним перерізом з подальшим їх перемішуванням, перетікання газу з проміжної посудини до імітатора камери

через розроблений змішувач із соплами. Визначено, як теплообмін зі стінками посудини впливає на параметри суміші, що досліджуються, а саме: тиск; масу компонента суміші; температуру в контрольній точці; температуру газу, осереднену за об'ємом. Змішувач системи генерації газової суміші дає можливість створення гомогенної паливної суміші з похибкою до 0,1 % за масою.

Перспективним напрямом використання розроблених числових моделей системи генерації газових сумішей на базі удосконаленого методу є побудова цифрового близнюка, у якому закони керування роботою систем мають корегуватися з урахуванням даних онлайн моніторингу технологічних параметрів від вбудованих датчиків..

Основні наукові результати, наведені в другому розділі, опубліковано в працях автора [1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16, 18, 19, 22].

У третьому розділі для запропонованої системи генерації багатокомпонентних газових сумішей описано розроблену методику визначення характеристик, таких як компонентний склад технічних газів, коефіцієнти витрат сопел, площини критичних перерізів у соплах, частки газу в паразитних (технологічних) об'ємах, об'єм посудин складної форми. Це дозволяє отримати параметри, необхідні для формулювання закону керування виконавчими елементами, що забезпечує необхідну точність дозування компонентів.

Запропоновано спосіб швидкісного визначення об'єму посудини довільної форми, який передбачає заповнення вимірюваної посудини газом та його дренажу при надкритичному витіканні з сопла при вимірюванні тиску в посудині, у якому використовують сопло з попередньо визначеним коефіцієнтом витрати, а вимірювання тиску проводять багаторазово, що дозволяє визначити вимірюваний об'єм за час у діапазоні від 0,5 до 1 секунди. Під час імітаційного моделювання процесу вимірювання об'єму посудини складної форми (рис. 7) похибка його визначення за даними CAD моделі склала 0,0625 %.

Спосіб може бути застосований для широкого кола задач, для яких допускається наповнення вимірюваних посудин газом з тиском, що забезпечує можливість реалізації надкритичного витікання в атмосферу.

До посудини, що вимірюється і наповнена газом до тиску, який забезпечує надкритичне перетікання впродовж планованого часу, під'єднується сопло з попередньо розрахованим коефіцієнтом витрат завдяки нормально закритому електромагнітному клапану. Потім зазначений клапан, який з'єднує посудину, що вимірюється, і сопло, відкривається та газ із посудини, що вимірюється, перетікає до навколишнього середовища. Враховуючи те, що час відкриття електромагнітних клапанів

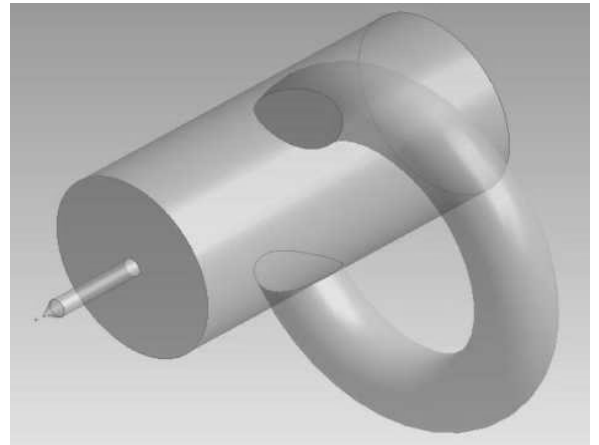
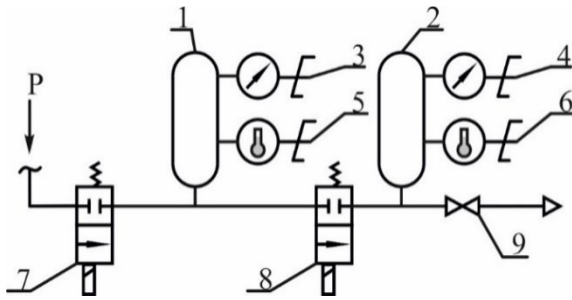


Рисунок 7 – Модель посудини, що має складну форму, при визначенні об'єму за надкритичного витікання

становить близько 0,1 с, а також враховуючи наявність перехідного процесу в газових трактах, тривалість якого може становити до 0,4 с, для забезпечення точності результату вимірювання їх необхідно проводити з часу $t = 0,5$ с від початку дренажування. Для запобігання випадкових похибок необхідно здійснювати серію вимірювань у проміжку часу 0,5...1,0 с, а об'єм, що визначається, розраховується за виразом:

$$V_0 = \frac{I}{N} \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{\left[\left(P_1/P_0 \right)^{-(k-1)/2k} - 1 \right]} \frac{\mu \psi (k-1) F \sqrt{RT_0}}{2} \quad (19)$$



- 1 – посудина, що вимірюється;
- 2 – еталонна ємність;
- 3, 4 – датчики температури;
- 5, 6 – датчики тиску;
- 7, 8 – клапани; 9 – вентиль

Рисунок 8 – Схема під'єднання еталонної ємності до посудини, що вимірюється

Запропоновано спосіб вимірювання об'єму посудини в якому її об'єм змінюється на відому величину, а вимірювання тиску та температури виконуються в проміжку часу коли відношення P до T не змінюється ($P/T = const$). Вимірювання виконуються до початку змінення об'єму на відому величину та після його змінення. Змінення об'єму посудини 1 виконується приєднанням еталонної ємності 2 завдяки відкриттю клапану 8 (рис. 8)

Об'єм посудини, що вимірюється, можна визначити за виразом:

$$V_0 = \Delta V \frac{P_2 T_1}{(P_1 T_2 - P_2 T_1)} \quad (20)$$

Проведено експериментальне дослідження змінення маси газу в проміжній посудині протягом її наповнення. Числові моделі було скориговано за результатами порівняльного аналізу даних моделювання та натурних експериментів визначення маси газу в посудині (рис. 9, 10). Зрештою, похибка результатів моделювання та експериментів щодо маси газу в проміжній посудині становить не більше 0,5 %.

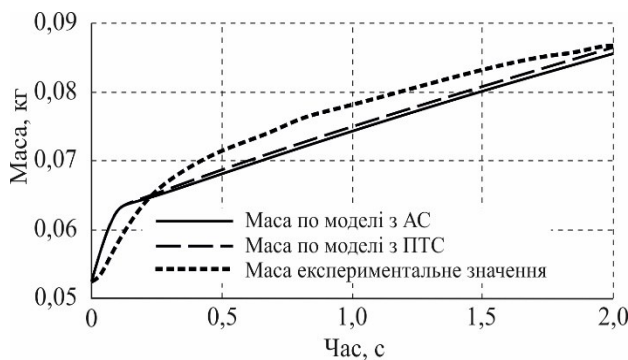


Рисунок 9 – Змінення маси газу в посудині при її наповненні з витратою $G=13,62$ г/с

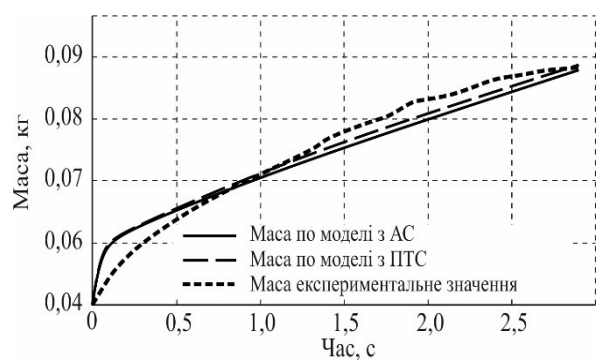


Рисунок 10 Змінення маси газу в посудині при її наповненні з витратою $G=11,29$ г/с

Основні наукові результати, наведені в третьому розділі, опубліковано в працях автора [6, 15, 20, 21, 4, 17].

У четвертому розділі описано розроблений прецизійний генератор газових сумішей для процесів фізико-технічної обробки на базі вдосконаленого методу отворів із критичним перерізом, у якому компоненти суміші подають з попередньо наповнених до початкового тиску проміжних посудин, що передбачають регулювання об'єму (рис. 11, 12).

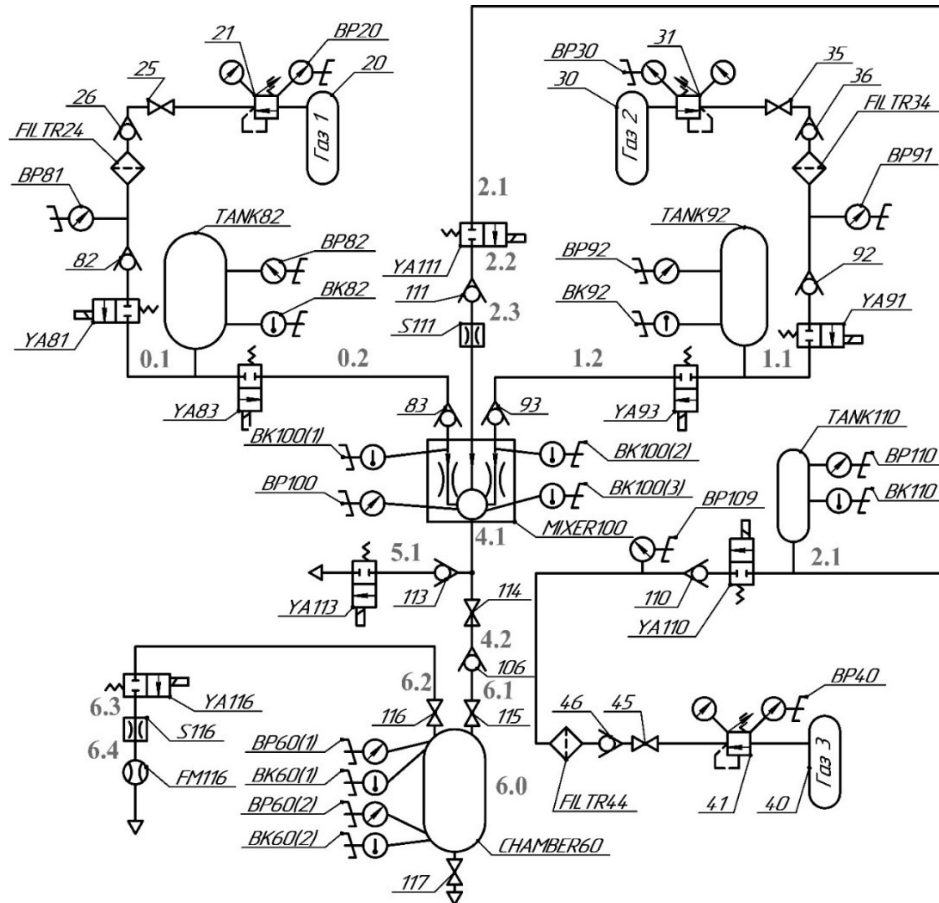
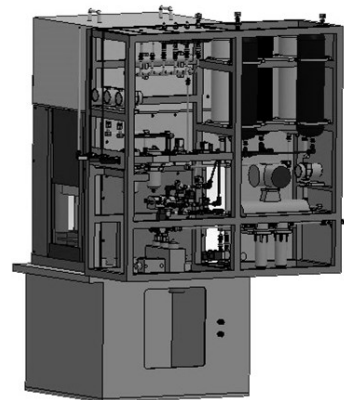


Рисунок 11 – Схема розробленого прецизійного генератора газових сумішей



а



б

Рисунок 12 – Фотографія (а) та тривимірна модель монтажу на термоімпульсній установці (б) прецизійного генератора газових сумішей з інтегрованою пневматичною системою

Розроблений генератор газових сумішей складається з фільтрів, проміжних посудин, змішувача, камери. Керування процесом генерації газової суміші відбувається за допомогою системи ЧПК, шляхом подачі сигналів на електромагнітні клапани (відкриття та закриття) та контролю тиску і температури за допомогою відповідних датчиків.

Розроблено алгоритм керування генерацією суміші (рис. 13) на термоімпульсному устаткуванні. В алгоритмі роботи системи керування генератором газової суміші передбачено контроль виконання умов перепаду тиску для забезпечення критичного перетікання газів через відповідні сопла упродовж усього періоду генерації паливної суміші, а також можливість корекції режиму наповнення робочої камери.

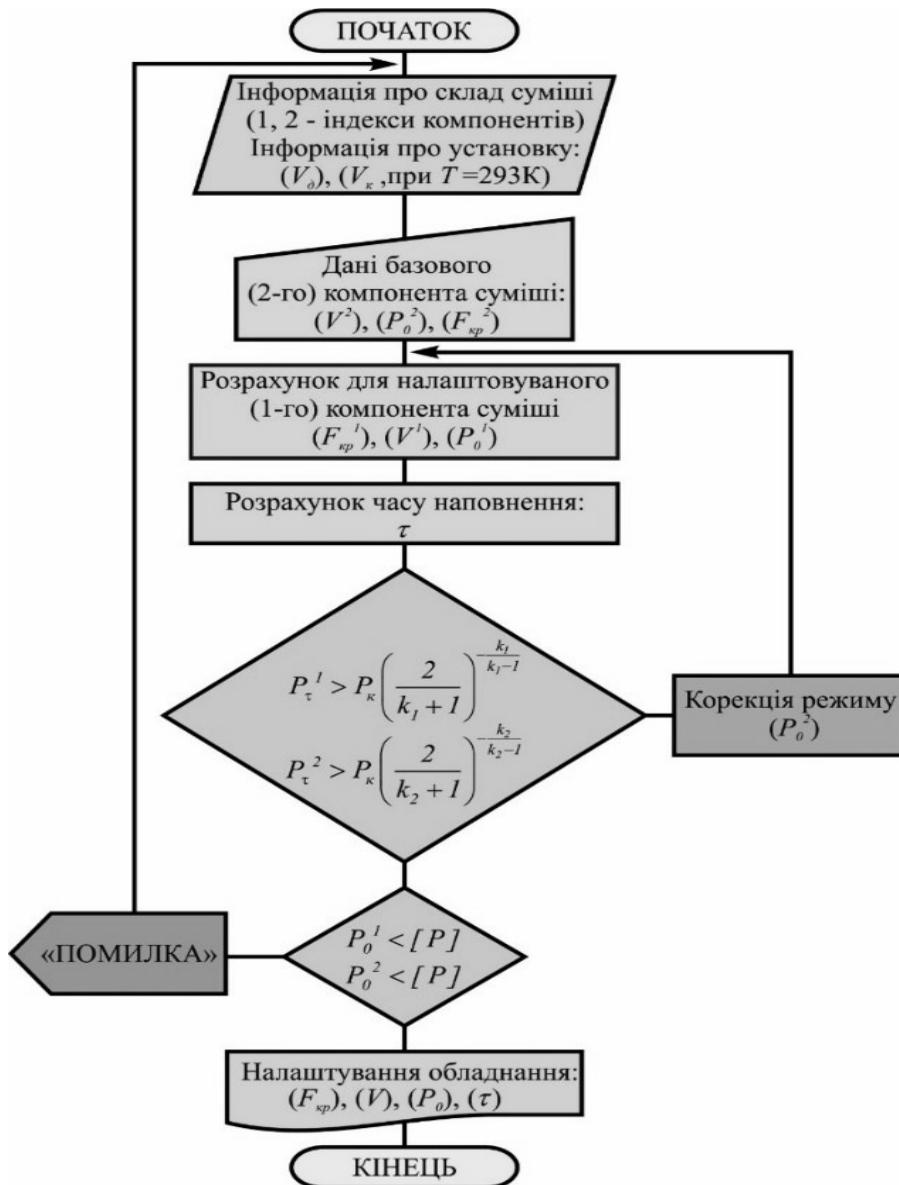


Рисунок 13 – Блок-схема алгоритму керування генерацією суміші

Виявлено необхідність керування швидкістю відкриття та закриття клапанів подачі газів з урахуванням необхідного значення співвідношення площин

критичних перерізів отворів. Представлена послідовність керування роботою системи дозування та приготування паливної суміші.

Основні наукові результати, наведені в четвертому розділі, опубліковано в працях автора [1, 3, 14].

ВИСНОВКИ

Основні результати дослідження наступні.

1. Удосконалено метод отворів із критичним перерізом для генерації багатокомпонентних газових сумішей, що полягає в подачі компонентів з посудин, що передбачають регулювання об'єму, згідно з виконанням умови забезпечення рівності температур газів у посудинах під час їхнього перетікання, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонентів у робочій посудині із сумішшю без додаткового регулювання.

2. Розроблено аналітичні та числові моделі, які дозволяють визначити об'єми та початковий тиск у посудинах з компонентами газової суміші для удосконаленого методу отворів із критичним перерізом.

3. Розроблено методикау визначення характеристик системи генерації багатокомпонентної газової суміші, яка дозволяє отримати необхідні параметри, необхідні для формулювання закону керування виконавчими елементами, що забезпечує необхідну точність дозування компонентів.

4. Розроблено систему генерації багатокомпонентної газової суміші на базі удосконаленого методу отворів із критичним перерізом. Новизна запропонованих технічних рішень підтверджена патентами України на винахід та корисні моделі. Проведено експериментальні випробування розробленої системи, які підтвердили можливість реалізації запропонованого способу генерації газових сумішей для процесів фізико-технічної обробки.

5. Розроблено алгоритм керування генерацією суміші на термоімпульсному устаткуванні. Показано необхідність керування швидкістю відкриття та закриття клапанів подачі газів з урахуванням необхідного значення співвідношення площин критичних перерізів отворів. Представлена послідовність керування роботою системи дозування та приготування паливної суміші.

6. Показано, що перспективним напрямом використання розроблених числових моделей системи генерації газових сумішей на базі удосконаленого методу є побудова цифрового близнюка, у якому закони керування роботою систем мають корегуватися з урахуванням даних онлайн моніторингу технологічних параметрів від вбудованих датчиків.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, у яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи

Монографії (розділи в колективних монографіях)

1. Розробка генератора паливної суміші для прецизійного термоімпульсного оброблення / С. О. Заклінський та ін. // Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими

сумішами наукові матеріали : монографія / С. І. Планковський, та ін. ; ред. С. І. Планковський. – Харків, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – 2020. – С. 134–171.

Статті в наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

2. Планковський С.І. Перспективи застосування сучасних методів генерації газових сумішей для прецизійної термоімпульсної обробки / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2017. – № 3 (138). – С. 85–93. – Режим доступу: <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/download/aktt.2017.3.06/552>

3. Алгоритм управління системою генерації суміші для прецизійної термоімпульсної обробки / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклінський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2018. – № 5 (149). – С. 58–66. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2018.5.09>

4. Планковський С. І. Застосування сопел надкритичного витікання для швидкісного вимірювання об'єму посудин / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 4 (164). – С. 66–73. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.4.08>

5. Числове дослідження змішування в системі генерації газової суміші / В. Є. Гайдачук, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, В. О. Гарін, О. В. Трифонов, С. І. Планковський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 6 (176). – С. 39–47. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.6.05>

6. Числове та еспериментальне дослідження наповнення резервуару компонентом газової суміші / О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, В. В. Комбаров, О. А. Павленко, В. О. Гарін // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 4 (172). – С. 63–72. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4.09>

7. Розробка цифрового близнюка наповнення резервуару газовою сумішшю / В. О. Гарін, Д. А. Ткаченко, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, О. В. Трифонов, С. І. Планковський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 5 (183). – С. 40–50. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.5.03>

8. Dynamic method of gas mixtures creation for plasma technologies / Plankovskyy S., Shypul O., Zaklinsky S., Tryfonov O. // Problems of atomic science and technology. – 2018. – №. 6 (118). – P. 189–193. – Режим доступу: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_6/article_2018_6_189.pdf

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію

9. A digital twin design of induction motor with squirrel-cage rotor for insulation condition prediction / Pliuhin V., Zaklinsky S., Plankovskyy S., Tsegelnyk Y., Aksonov O., Kombarov V. // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. – 2023. – Issue 14. – P. 185–191. – Mode of access: <http://doi.org/10.17683/ijomam/issue14.22>

Патенти на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу

10. Спосіб генерації газової суміші : патент України № 125380 : МПК В01F3/02, В01F 13/00, G05D 11/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, С. О. Заклінський, Г. С. Тевзадзе. – № а201810303 ; заявл. 17.10.2018 ;

опубл. 02.03.2022, Бюл. № 9. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=125380&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Планковський С. І. Шляхи створення прецизійної системи сумішеутворення для термоімпульсної обробки / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні : тези доп. всеукр. наук.-техн. конф., [Харків], 15-17 листоп. 2016 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2016. – Т. 1. – С. 34.

12. Планковський С. І., Шипуль О. В., Заклінський С. О. Вибір методу підготовки газової суміші для термоімпульсної обробки // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 20-21 квіт. 2017 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – Харків, 2017. – С. 59.

13. Планковський С. І. Проектування сопла для підготовки газової суміші при термоімпульсній обробці прецизійних деталей літальних апаратів / С. І. Планковський, С. О. Заклінський // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 17-18 квіт. 2018 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». — Харків, 2018. – С. 51.

14. Планковський С. І. Особливості конструкції газонаповнювальної системи термоімпульсної установки / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків] 23-24 квіт. 2019 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2019. – С. 59.

15. Планковський С. І. Моделювання генератора паливної суміші термоімпульсної установки / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський // New leading technologies in machine bulding : proceedings XXIX international conference., [Koblevo – Kharkiv], 3-8 sept. 2019 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Koblevo – Kharkiv, 2019. – С. 94.

16. Гарін В. О. Основи створення «цифрового близнюка» газонаповнювальної системи термоімпульсної установки / В. О. Гарін, С. О. Заклінський, О. В. Трифонов // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., [Харків], 28-29 квіт. 2020 р. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2020. – С. 30.

17. A Method of Rapid Measurement of Vessels Volume with Complex Shape by Critical Nozzles / Plankovsky S., Shypul O., Zaklinsky S., Tsegelnyk Y., Kombarov V. (2021). In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. ICTM 2020 / Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – vol 188. – P. 247–255. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_20

18. Numerical simulations of mixture formation to ensuring the quality of thermal deburring / S. Plankovskyy, O. Shypul, S. Zaklinskyy, Y. Tsegelnyk, O. Bezkorovaina // International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering (CAMPE 2021). October 29-30, 2021 / Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. – 2022. – P. 108–117. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_11

19. Development of a Digital Twin of Reservoir Filling by Gas Mixture Component / Shypul O., Garin V., Tkachenko D., Zaklinskyy S., Tryfonov O., Plankovskyy S. // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2022) / Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2023. – P. 85–98. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_7

Список наукових публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації

20. Спосіб визначення об'єму посудини : патент України на корисну модель № 147610 : МПК G01F 17/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров. – № u202007627 ; заявл. 30.11.2020; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-AX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147610&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

21. Спосіб визначення об'єму посудини : патент України на корисну модель № 147597 : МПК G01F 17/00 / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров. – № u202006623 ; заявл. 15.10.2020; опубл. 26.05.2021, Бюл. № 21. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=147597&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

22. Спосіб приготування газової суміші заданого складу : патент України на корисну модель № 146262 : МПК B01F 3/00/ С. І. Планковський, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров, Г. С. Тевзадзе, В. О. Гарін. – № u202005803 ; заявл. 10.09.2020; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. – 4 с. – Режим доступу: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=2&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=146262&form-1-param_type=6&form-1-value=Заклінський

АНОТАЦІЯ

Заклінський Сергій Олександрович. Удосконалення методу критичних отворів для генерації газових сумішей у процесах фізико-технічної обробки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки. – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено розробці вдосконаленого методу отворів із критичним перерізом для генерації газових сумішей у процесах фізико-

технічної обробки. У роботі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень.

На основі проведених досліджень запропоновано вдосконалений метод отворів із критичним перерізом для генерації багатокомпонентних газових сумішей, що полягає в подачі компонентів з посудин, що передбачають регулювання об'єму, згідно з виконанням умови забезпечення рівності температур газів у посудинах під час їхнього перетікання, що дозволяє забезпечувати задане масове співвідношення компонентів у робочій посудині із сумішшю без додаткового регулювання.

Спроектовано змішувач з інтегрованими соплами які можна замінити через технологічні корки, з можливістю встановлювати додаткові датчики вимірювань і запропоновано спосіб зменшення нетехнологічних витрат газів при продувці посудин через зміну їх об'єму до мінімального.

Розроблено аналітичну модель удосконаленого методу генерації двокомпонентної суміші за заданим співвідношенням масових концентрацій компонентів для наповнення робочої камери термоімпульсного устаткування, за якою визначаються об'єм та початковий тиск у посудинах з компонентами газової суміші. Розроблені числові моделі елементів вдосконаленого генератора газових сумішей.

Для забезпечення заданої точності запропоновані методики визначення характеристик системи генерації газової суміші. Запропоновано метод швидкісного визначення об'єму посудини довільної форми, що включає заповнення вимірюваної посудини газом та його дренажування при надкритичному витіканні із сопла, для якого попередньо визначено коефіцієнт витрати, з багаторазовим вимірюванням тиску в посудині, яке проводять у діапазоні від 0,5 до 1 секунди.

Запропоновано спосіб вимірювання об'єму посудини, при якому її об'єм змінюється на відому величину, а вимірювання тиску та температури виконуються в проміжку часу коли відношення тиску P до температури T не змінюється ($P/T = const$). Вимірювання виконуються до початку змінення об'єму на відому величину та після його змінення.

Розроблено методику визначення площини критичного перерізу в отворі, за якою вимірюються мінімальні та максимальні розміри отвору, після чого будується його профіль та визначається його площа. Запропоновано методику визначення коефіцієнту витрати сопла.

Розроблено прецизійний генератор газових сумішей на основі технічних рішень вдосконаленого методу отворів із критичним перерізом, у якому компоненти суміші подають із попередньо наповнених до початкового тиску проміжних посудин, які передбачають регулювання об'єму, що дозволяє забезпечити похибку дозування компонентів паливної суміші на рівні до 0,1 % за масою.

Розроблено алгоритм керування генерацією газової суміші на термоімпульсному устаткуванні. Передбачено контроль виконання умов перепаду тиску для забезпечення критичного перетікання газів через відповідні сопла упродовж усього періоду генерації паливної суміші, а також можливість корекції

режиму наповнення робочої камери.

Вихідні дані для генерації суміші які вносяться до бази даних системи ЧПК є характеристики компонентів суміші, об'єми проміжних посудин, паразитні об'єми та значення коефіцієнтів витрат отворів з критичним перерізом.

Показано необхідність керування швидкістю відкриття та закриття клапанів подачі газів з урахуванням необхідного значення співвідношення площин критичних перерізів отворів.

Сформовано науково-технічну базу, яка використовується під час виконання науково-дослідних робіт та навчання здобувачів вищої освіти в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Ключові слова: генерація газових сумішей, точність дозування компонентів газової суміші, гомогенність газової суміші, математична модель газодинамічного процесу, числове моделювання, критичне перетікання, термоімпульсна обробка.

ABSTRACT

Zaklinskyi Serhii. Improvement of the Critical Orifice Method for Generating Gas Mixtures in Physical and Technical Treatment Processes. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.03.07 – Processes of Physical and Technical Treatment. – National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The thesis is dedicated to the development of an improved method of critical orifices for generating gas mixtures in physical and technical treatment processes.

An improved method of generating multicomponent gas mixtures has been developed. in which the supply of components is carried out through critical holes from vessels of adjustable volumes, the values of which are calculated based on the condition of ensuring the equality of gas temperatures in the vessels during flow.

A scientific and technical base has been formed, which is used in the performance of scientific research works and training of higher education seekers at the National Aerospace University named after M. E. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute».

Keywords: gas mixture generation; accuracy of gas mixture component dosing; homogeneity of gas mixture; mathematical model of gas dynamic process; numerical simulation; critical flow; thermo-impulse processing.

Підписано до друку
Формат 60×84 1/16. Папір офс. Офс. Друк
Ум. Друк. Арк. 1,0. Наклад 100 пр. Замовлення №

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків -70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, м. Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001