



## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Заклінського Сергія Олександровича

«Удосконалення методу критичних отворів для генерації газових сумішей  
у процесах фізико-технічної обробки»,

що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, і складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 184 сторінки, з яких основного тексту 141 сторінки, у тому числі: 73 рисунки, 13 таблиць, список використаних джерел із 97 найменувань на 14 сторінках, додатки на 10 сторінках..

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** 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 застосовуваних сумішей, але й необхідністю досягнення їх гомогенності та гарантованого співвідношення газових компонентів. 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.

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 способів формування газових сумішей. Цей метод не лише забезпечує найвищу продуктивність у генерації сумішей у широкому діапазоні концентрацій, але й забезпечує 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 є необхідною передумовою для забезпечення високих стандартів якості в процесах фізико-технічної обробки.

**Обґрунтованість та достовірність наукових результатів** підтверджується застосуванням класичних числових методів розв'язання задач процесів течії багатокомпонентних сумішей з використанням ліцензованого сертифікованого програмного забезпечення; публікацією результатів досліджень в наукових журналах, реферованих у наукометричній базі Scopus, в яких забезпечуються вимоги щодо рецензування публікацій; достатнім рівнем аналізом сучасного стану розвитку питання за темою дисертації; проведеними натурними експериментами, в яких досліджування виконувались на експериментальному стенді генерації газових сумішей у лабораторних умовах з використанням сучасної контрольної 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.

**Апробація результатів дисертації.** Апробація роботи є достатньою. 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.).

**Загальна характеристика дисертації.** Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Автореферат та опубліковані статті відображають основний зміст і результати дисертаційної роботи. Отримані результати 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. Також додатково отримані 3 патенти на корисні моделі запропонованих у роботі рішень.

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 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.

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.

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.

### **Зауваження та дискусійні питання до дисертаційної роботи.**

1. Для розрахунків параметрів генератора використовувалась аналітична модель з певними припущеннями та деякими спрощеннями, зокрема щодо адіабатичності процесу перетікання. Автор в роботі не вказує, як це враховується при генерації газової суміші в реальних умовах.

2. В експериментальній частині не проведено дослідження для оцінки фактичних похибок дозування компонентів у готовій суміші та їх порівняння із даними числового моделювання.

3. Із запропонованого способу генерації газової суміші зрозуміло, що одна зі складових керування цим процесом здійснюється через задання об'єму проміжних посудин. Автор у своїй роботі не вказує, яким чином здійснюється змінення цих об'ємів у розробленому прецизійному генераторі газових сумішей.

### **Висновок по дисертації.**

Незважаючи на зазначені зауваження, дисертаційна робота Заклінського С. О. «Удосконалення методу критичних отворів для генерації газових сумішей у процесах фізико-технічної обробки» є завершеним науковим дослідженням. Дисертаційна робота за метою і завданням, що вирішуються в ній, а також спрямованістю основних результатів, які відображають її актуальність, наукову новизну і практичну цінність, повною мірою відповідає паспорту спеціальності 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки. Дисертація Заклінського С. О. відповідає вимогам які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата наук згідно з «Порядком присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки.

Офіційний опонент, професор  
кафедри технології машинобудування  
та металорізальних верстатів

Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»

доктор технічних наук, професор



Сергій ДОБРОТВОРСЬКИЙ

Підпис *Сергія Доброворського*  
ЗАСВІДЧУЮ:  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
" " 20\_\_ р.

ЗАЙЦЕВ Ю. І.