

## ВІДГУК

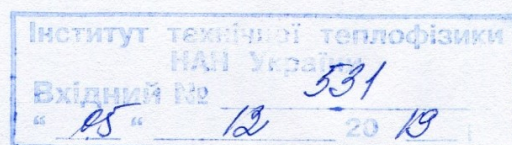
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
АБДУЛІНА МИХАЙЛА ЗАГРЕТДИНОВИЧА

### РОЗРОБЛЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ЗАСАД ТЕХНОЛОГІЙ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ СИСТЕМ

що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова  
теплоенергетика

#### 1. Актуальність теми.

Невід’ємною частиною загальної проблеми енергоспоживання та економічної стабільності в Україні є ефективне функціонування економіки країни за рахунок стійкого забезпечення всіх видів виробництва паливно-енергетичними ресурсами. Наразі в Україні існує досить суттєва залежність від імпорту природного газу, значна кількість якого споживається в галузях виробництва із застарілими технологіями та недостатньо ефективним теплоенергетичним обладнанням. Розробка сучасних технологій спалювання палива та ефективних, надійних і довговічних пальникових пристроїв відкривають можливості підвищення ефективності теплоенергетичних установок, зниження рівня токсичних викидів тощо. Слід зазначити, що вирішення проблеми спалювання палива в пальникових пристроях пов’язане з певними труднощами, які стосуються складності процесів сумішоутворення палива і окиснювача, стабілізації полум’я, вигорання палива, формування температурних полів зони горіння тощо. Одним з перспективних напрямів вдосконалення технологій спалювання палива в пальникових пристроях є застосування технологій, заснованих на використанні струменево-нішових систем. Великий внесок у розвиток цієї тематики здійснено роботами М.М. Семенова, Д.А. Франк-Каменецького, Ф.А. Вільямса, Л.М. Хітріна, Л.А. Вуліса, Л.П. Ярінова, Л.С. Бутовського, Г.Н. Абрамовича, А.В. Сударева, Д.Б. Ахмедова, Ю.В. Іванова, В.А. Христича, Г.М. Любчика, І.Я. Сігала, А.І. Карпа,



Б.С. Сороки, О.Е. Еринова, В.Н. Крижановського та інших провідних фахівців. Найвні роботи однак, не задовольняють зростаючі потреби енергетичної практики. Це стосується, насамперед, системних досліджень теплофізичних аспектів робочих процесів різних типів автономних паливних модулів із застосуванням струменево-нішових систем. Потребують подальшого розвитку також дослідження робочих процесів систем, що складаються з кількох струменево-нішових паливних модулів.

Спрямованість дисертаційної роботи на удосконалення технологій спалювання газоподібних палив на основі струменево-нішових систем та розроблення на цій основі відповідних технічних рішень та рекомендацій щодо їх впровадження зумовлює беззаперечну актуальність дисертації для теорії та практики енергетичних систем в багатьох галузях виробництва.

### **1. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основні результати роботи отримано при виконанні таких бюджетних тем: — на кафедрі ТЕУ Т і АЕС НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» щодо НДР «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації» (державний реєстраційний номер 0112U001751); НДР «Розробка технології використання скидних енергоресурсів та альтернативних паливних газів на основі їх високоефективного спалювання» (державний реєстраційний номер 0113U001773);

— у відділі теплофізики енергоефективних теплотехнологій ІТТФ НАНУ: шифр теми 1.7.1.663 «Підвищення ефективності газоспоживальних котельних установок шляхом застосування струменево-нішової технології спалювання палива» (державний реєстраційний номер 0105U006885).

### **2. Наукова новизна отриманих результатів.**

В результаті детального розгляду дисертаційної роботи можна стверджувати, що її наукова новизна полягає у створенні теплофізичних основ технологій спалювання палив із застосуванням струменево-нішових систем та встановленні закономірностей теплофізичних процесів, що протікають у

пальникових пристроях зі струменево-нішовою системою сумішоутворення та стабілізації горіння. В загальному вигляді серед наукових результатів дисертації, одержаних вперше, можна відзначити такі:

- Уперше у широкому діапазоні зміни визначальних параметрів отримано дані експериментальних досліджень та виконано порівняльний аналіз характеристик процесів течії, сумішоутворення, теплопереносу, стабілізації полум'я і вигорання палива для поодиноких струменевих і струменево-нішових модулів пальників з нішовими порожнинами різного типу за наявності та відсутності структураторів потоку.

- Уперше виявлено основні закономірності протікання робочих процесів систем, що складаються з декількох струменево-нішових модулів; показано, що у цих системах має місце значне скорочення довжини факела у порівнянні з автономним модулем; встановлено факт практичної ідентичності робочих процесів в окремих модулях системи, що обумовлює правомірність використання модульного підходу до конструювання пальників даного типу.

- Уперше для струменево-нішових пальників з трапецієподібними нішовими порожнинами встановлено закономірності теплообміну та аеродинаміки у спеціальних системах їх охолодження, які характеризуються тим, що у них як охолоджувальний агент застосовується паливний газ перед його надходженням на спалювання; проведено аналіз теплового стану цих пристроїв і виконано загальну оцінку ефективності їхніх систем охолодження.

- Виконано зіставлення основних характеристик робочих процесів пропонованих пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем і традиційно використовуваних пальників у складі вогнетехнічних об'єктів комунальної та промислової енергетики.

#### **4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій**

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, підтверджено великим обсягом теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних особисто автором після глибокого

аналізу стану досліджуваної проблеми, використанням сучасного сертифікованого обладнання і контрольно-вимірювальної апаратури, сучасних ефективних методик і адекватних теплофізичних моделей, коректністю фізичних припущень та позитивним досвідом впровадження результатів дисертаційної роботи. Достовірність результатів числових розрахунків підтверджено порівнянням їх з даними інших авторів, а також з результатами експериментальних досліджень.

Основні наукові положення і результати роботи, що відповідають тематиці дисертації, пройшли широку апробацію при публікації в провідних вітчизняних та зарубіжних фахових виданнях, були обговорені на багатьох вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. За результатами роботи отримано 3 Патенти України на винаходи і 4 патенти на корисну модель.

#### **5. Наукове значення роботи.**

На основі експериментальних та теоретичних досліджень впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики пальникових пристроїв зі струменево-нішовою системою сумішоутворення та стабілізації горіння отримано нові наукові дані, що розширюють сучасні уявлення щодо процесів течії, сумішоутворення, теплопереносу, стабілізації полум'я і вигорання палива в пальникових пристроях.

#### **6. Практичне значення отриманих результатів**

Отримані в роботі результати було покладено в основу пропонованих рекомендацій з вибору геометричних і режимних параметрів паливоподачі, раціональних значень діаметрів газоподавальних отворів, відносних кроків їх розташування, розмірів нішової порожнини, діапазонів зміни гідродинамічного параметра та коефіцієнта надлишку повітря, завдяки чому стало можливим розробка ефективних конструкцій пальників зі струменево-нішовою системою.

Результати виконаних досліджень впроваджено більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктах в Україні, Білорусі, Росії, Польщі, Казахстані. Сертифіковано більше 100 типів і моделей розроблених пальникових пристроїв. Отримані в роботі результати можуть бути використані при розробці нових та

модернізації з метою підвищення ефективності існуючих пального пристроїв енергетичного та промислового призначення.

### **7. Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих роботах**

Всі викладені в дисертації основні наукові положення в повному обсязі відображено в статтях, опублікованих у міжнародних та вітчизняних профільних виданнях, а також у тезах доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях. Кількість робіт та видання, в яких опубліковано статті автора, відповідають вимогам ВАК України. Зміст публікацій відповідає матеріалам, викладеним у дисертації. Всього за матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 54 друкованих праці, зокрема: 1 монографія; 2 статті, що входять до наукометричної бази Scopus; 14 статей, що входять до інших наукометричних баз; 2 статті у закордонних виданнях; 15 статей у спеціалізованих фахових виданнях; 11 статей в інших виданнях; 2 публікації в матеріалах міжнародних конференцій в Україні і за кордоном; 3 патенти на винаходи і 4 патенти на корисну модель.

### **8. Структура дисертації.**

Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків та 4 додатків. Основний матеріал викладено на 290 сторінках, 205 рисунках, 19 таблицях. Бібліографія містить 205 найменувань робіт на 25 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 390 сторінок.

### **9. Редакційний аналіз.**

Дисертація і автореферат викладені літературною мовою послідовно, грамотно та доступно, фрази чіткі і завершені, усі рисунки інформативні та правильно оформлені, читання формул не викликає труднощів. Оформлення дисертації відповідає вимогам ВАК України.

### **10. Відповідність тексту автореферату і дисертації.**

Текст автореферату адекватний змісту, структурі та основним положенням дисертації.

## **Аналіз основного змісту роботи.**

**У вступі** обґрунтовано тему дисертації, актуальність проведення досліджень, визначено мету роботи, сформульовано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також наведено інші необхідні відомості щодо загальної характеристики роботи.

**У першому розділі** проведено аналітичний огляд літературних даних про сучасні підходи до системних досліджень робочих процесів в пальникових пристроях із застосуванням струменево-нішових систем. Відмічається, що великий внесок у розвиток цієї тематики здійснено роботами: М.М. Семенова, Д.А. Франк-Каменецького, Ф.А. Вільямса, Л.М. Хітріна, Л.А. Вуліса, Л.П. Ярінова, Л.С. Бутовського, Г.Н. Абрамовича, А.В. Сударева, Д.Б. Ахмедова, Ю.В. Іванова, В.А. Христича, Г.М. Любчика, І.Я. Сігала, А.І. Карпа, Б.С. Сороки, О.Е. Еринова, В.Н. Крижановського та інших провідних фахівців.

Огляд літературних джерел показав, що наявні роботи не задовольняють зростаючі потреби енергетичної практики. Це стосується, насамперед, системних досліджень теплофізичних аспектів робочих процесів в автономних струменево-нішових пальникових модулях та в системах, що складаються з кількох пальникових модулів. Подальшого розвитку потребують також дослідження їхніх систем охолодження. Виконаний аналіз засвідчив необхідність розроблення технічних рішень і ефективних конструкцій пальників зі струменево-нішовими системами та проведення їх випробувань у складі різних вогнетехнічних об'єктів.

На основі проведеного огляду літературних джерел обґрунтовано актуальність роботи та сформульовано завдання досліджень.

**У другому розділі** розглядаються методики експериментальних досліджень, методика математичного моделювання робочих процесів пальників зі струменево-нішовими системами та методика промислових випробувань пальникових пристроїв згідно зі стандартами підприємств. Наводяться описи експериментальних стендів, відповідної вимірювальної апаратури, а також оцінки похибок вимірювання досліджуваних величин. Математичне

моделювання процесів переносу при дослідженні систем охолодження палиникових пристроїв струменево-нішового типу здійснювалось з використанням пакета FLUENT. Наведено відповідну математичну модель. У роботі виконано верифікацію моделі турбулентності, за результатами якої показано, що розглянутій ситуації найбільшою мірою відповідає RNG  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності.

**У третьому розділі** наводяться результати експериментальних досліджень робочого процесу автономних палиникових модулів різних типів – струменевих і струменево-нішових з нішовими порожнинами різної конфігурації.

Слід відмітити важливість з наукової точки зору отриманих автором закономірностей течії, особливостей сумішоутворення палива і окиснювача, стабілізації полум'я і вигорання палива та формування теплового стану стінок для струменевих модулів – модуля з уступом, і модуля з торцевою порожниною, а також модуля з прямокутною приструменевою нішою.

Для струменево-нішових паливних модулів з трапецієвидною нішою за наявності і відсутності структураторів потоку виконано комплекс експериментальних досліджень щодо встановлення закономірностей впливу геометричних параметрів ніші і структураторів потоку на характеристики течії і сумішоутворення палива і окиснювача. Автором показано, що застосування спеціального структуратора потоку, встановленого на передній за течією кромці ніші, сприяє формуванню у нішовій порожнині вихрових структур, які забезпечують надійну стабілізацію полум'я, а також призводить до деякого зниження інтенсивності турбулентності у нішовій порожнині.

За результатами досліджень гідравлічних втрат при обтіканні ніш різної конфігурації з боку газового тракту у складі палиникового модуля встановлено, що вказані втрати є дещо нижчими для ніш трапецієвидної форми порівняно з прямокутними нішами. Результати виконаних досліджень особливостей сумішоутворення в нішових порожнинах різної конфігурації показали, що концентраційні межі займання забезпечуються в трапецієвидних нішах при

менших ніж у прямокутних нішах значеннях відносного кроку розташування газоподавальних отворів.

**Четвертий розділ** присвячено дослідженням закономірностей стабілізації полум'я у власне струменево-нішових системах та пальниках на основі застосування таких систем. Для систем, в яких циркуляційні течії в нішових порожнинах слугують джерелом стабілізації полум'я, досліджено системи з прямокутними нішами.

Цінним внеском в науку і практику спалювання палива в пальникових пристроях можна вважати запропонований для цих систем експериментально-розрахунковий підхід до визначення характеристик бідного зриву полум'я та запропоновану відповідну узагальнювальну залежність. Автором встановлено залежність відношення витрат палива на режимах запалювання та бідного зриву від швидкості повітря та показано, що конфігурація нішової порожнини суттєво впливає на межі займання і бідного зриву. Як показали результати виконаних досліджень, застосування спеціального структуратора потоку, встановленого на передній за течією кромці ніші, сприяє формуванню у нішовій порожнині вихрових структур, які забезпечують надійну стабілізацію полум'я, а також призводить до деякого зниження інтенсивності турбулентності у нішовій порожнині.

Слід відзначити доречність застосування автором статистичних методів планування експерименту для визначення впливу геометричних параметрів паливорозподілу на характеристики бідного зриву для струменево-нішового модуля з прямокутною нішою. Одержано відповідні регресійні залежності для визначення пускових та зривних меж та визначено області рекомендованих значень цих параметрів за умов спалювання природного газу і пропан-бутану.

**У п'ятому розділі** наводяться результати експериментальних досліджень робочих процесів систем, що складаються з декількох пальникових модулів. При цьому розглядаються системи, скомпоновані зі струменевих і струменево-нішових модулів з прямокутними нішовими порожнинами, та модулів зручнообтічної форми.



За результатами виконаних досліджень, проведених у широкому практично важливому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку повітря і його швидкості для систем, що складаються з двох модулів з прямокутною нішою, встановлено факт значного скорочення довжини факелу у системі модулів з прямокутною нішою у порівнянні з поодиноким модулем. Показано, що на початковій стадії розвитку факела інтенсивність горіння для системи струменево-нішових модулів є суттєво вищою, ніж для системи струменевих модулів.

Теоретично і практично важливим є зроблений висновок, що ідентичність характеристик процесів горіння за окремими модулями, які входять до системи модулів, є основою для реалізації модульного принципу конструювання пальникових пристроїв зі струменево-нішовими системами.

**Шостий розділ** присвячено дослідженням на основі CFD моделювання течії та теплообміну в системах охолодження пальникових пристроїв на основі струменево-нішових конструкцій. Виконано цикл досліджень теплообміну та аеродинаміки у спеціальних системах їх охолодження, проведено аналіз теплового стану даних пристроїв і виконано загальну оцінку ефективності вказаних систем. На основі проведених досліджень встановлено закономірності течії та теплообміну у системах охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора полум'я круглими імпульсними струменями або плоским імпульсним струменем за умови використання дефлекторних конструкцій різної конфігурації.

Слід відмітити оригінальну конструкцію систем охолодження пальникових пристроїв, яка полягає в охолодженні стінок пальникових модулів природним газом, що спеціальним чином подається в їхню внутрішню порожнину і далі, після виконання своїх функцій холодоагенту, надходить у газоподавальні отвори і використовується як паливо.

За результатами проведених досліджень виконано ранжування розглянутих систем охолодження щодо їх ефективності. Показано, що найбільш ефективною є система охолодження зі спеціально спрофільованим дефлектором

з прямим торцем. Дещо поступається їй система з прямим направляючим дефлектором. Нижчою і практично однаковою ефективністю характеризуються системи охолодження із заокругленими дефлекторами.

**У сьомому розділі** наводяться результати досліджень характеристик розроблених пальникових пристроїв зі струменево-нішовими системами в лабораторних умовах та у складі вогнетехнічних об'єктів різного призначення.

Отримані результати покладено, зокрема, в основу пропонованих рекомендацій з вибору геометричних і режимних параметрів паливоподачі для досліджуваних пальникових пристроїв. За результатами виконаних досліджень робочих процесів відповідних автономних пальникових модулів та системи модулів розроблено технічні рішення та ефективні конструкції пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем для котельних агрегатів, промислових печей, сушарок тощо. Понад 100 типів розроблених пальників пройшли сертифікацію у ДП «Сертифікаційний центр». Проведено дослідження розроблених пальникових пристроїв у складі різних вогнетехнічних об'єктів і показано, що при цьому забезпечуються високі показники ефективності їх застосування. Результати роботи впроваджено більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктах в Україні, Білорусі, Росії, Польщі та Казахстані.

**У висновках** сформульовані основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи. У додатках наведено результати державних приймальних випробувань пальників і документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

### **Зауваження до дисертації.**

1. Матеріал дисертаційної роботи нерівномірно розподілений за розділами. Наприклад, третій розділ занадто великий за обсягом. Його можна було б розділити на два розділи, перший з яких стосувався б автономних струменевих модулів, а другий – струменево-нішових.

2. У другому розділі дисертації бажано було б більш детально зупинитися на оцінці похибок вимірювання досліджуваних величин.
3. У дисертації наводяться результати досліджень робочих процесів для ряду автономних палинкових модулів. Однак, для деяких з них розглядаються лише окремі елементи робочого процесу.
4. У четвертому розділі дисертації, присвяченому дослідженню закономірностей стабілізації полум'я, наводяться дані стосовно двох паливних газів – природного газу та пропан-бутану. Даним розділом однак обмежуються результати дослідження процесів горіння пропан-бутану. В роботі було б незайвим більше уваги приділити особливостям спалювання цього газу.
5. В роботі при обґрунтуванні модульного принципу конструювання палинкових пристроїв розглядаються результати досліджень робочих процесів систем, що складаються з декількох струменево-нішових модулів. При цьому, відповідні зіставлення з ситуацією, що відповідає автономним модулям, вкрай обмежені.
6. Висновки до роботи занадто деталізовані; їх можна було б суттєво скоротити без втрат для висвітлення змісту результатів досліджень
7. В оформленні дисертації мають місце деякі неточності, стилістичні та орфографічні помилки тощо.

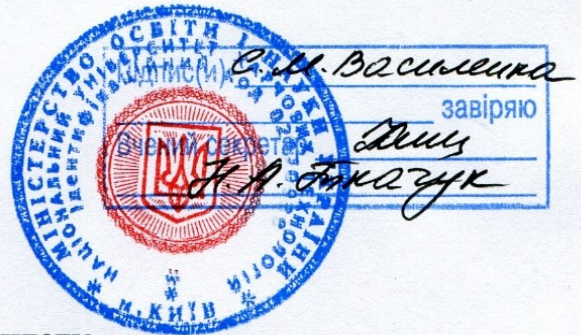
#### **Загальний висновок.**

Наведені зауваження не знижують позитивної оцінки дисертаційної роботи, а висловлені побажання можуть бути враховані у подальшій науковій діяльності автора. Дисертаційна робота Абдуліна Михайла Загретдиновича “Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив із застосуванням струменево-нішових систем” є повністю завершеною науковою роботою, в якій на підставі виконаних автором досліджень отримано нові результати, що вирішують актуальну наукову проблему створення

теплофізичних основ технологій спалювання палив із застосуванням струменево-нішових систем та обґрунтування ефективності застосування розроблених паливних пристроїв для теплоенергетичного устаткування різного призначення.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю основних наукових положень, висновків та рекомендацій, отриманими новими науковими результатами та їх практичною цінністю дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів та вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а її автор – Абдулін Михайло Загретдинович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент  
доктор технічних наук,  
професор, завідувач кафедри теплоенергетики  
та холодильної техніки Національного університету  
харчових технологій МОН України,



Василенко С.М.