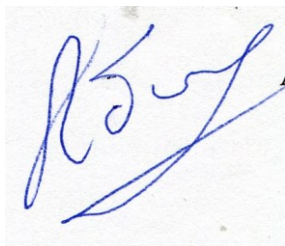


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**



АБДУЛІН МИХАЙЛО ЗАГРЕТДИНОВИЧ

УДК 621.43056.632.15

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

05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» та Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України, Заслужений діяч науки
і техніки України,
Фіалко Наталія Михайлівна
Інститут технічної теплофізики НАН України, завідувач
відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Василенко Сергій Михайлович
Національний університет харчових технологій МОН
України, завідувач кафедри теплоенергетики та
холодильної техніки;
доктор технічних наук, професор,
Дешко Валерій Іванович
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
МОН України, завідувач кафедри теплотехніки та
енергозбереження;
доктор технічних наук, професор,
Желих Василь Михайлович
Інститут будівництва та інженерії доквілля Національного
університету «Львівська політехніка», завідувач кафедри
теплопостачання та вентиляції.

Захист дисертації відбудеться 18 грудня, 2019р. о 13 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ-57, вул. Марії Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ-57, вул. Марії Капніст, 2а.

Автореферат розісланий: 15 листопада 2019р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Завдання підвищення енергетичної та екологічної ефективності теплоенергетичного устаткування наразі стають усе більш актуальними з огляду на неухильне дорожчання палива і підвищення вимог щодо стану довкілля. Одним із важливих напрямів підвищення ефективності даного устаткування є використання нових прогресивних технологій спалювання палива. Серед таких технологій особливо виділяються технології, засновані на використанні струменево-нішових систем. Потреби розвитку цих технологій зумовлюють необхідність їх всебічного аналізу, що базується як на експериментальних дослідженнях, так і на застосуванні сучасних методів математичного моделювання.

Вказані технології як об'єкт теплофізичних досліджень являють собою комплекс складних процесів сумішоутворення палива і окиснювача, стабілізації полум'я, вигорання палива, формування температурних полів зони горіння тощо.

Однак на сьогодні відсутня необхідна комплексність і повнота досліджень теплофізичних аспектів технологій спалювання палива на основі застосування струменево-нішових систем. Отже, тема дисертаційної роботи, присвячена розробленню теплофізичних засад даної технології, є актуальною.

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).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є науково-технічне обґрунтування прогресивних технологій спалювання газоподібних палив на основі струменево-нішових систем та розроблення на цій основі відповідних технічних рішень та рекомендацій щодо їх впровадження. Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали такі завдання:

1. Виконати комплекс експериментальних досліджень щодо встановлення закономірностей перебігу робочих процесів у поодиноких пальникових модулях різних типів: а) струменевих модулях – модулях з уступом та модулях з торцевою нішою; б) струменево-нішових модулях з прямокутною нішою – зручнообтічних модулях та модулях з торцевою нішою; в) струменево-нішових модулях з трапецієподібними нішами за наявності та відсутності структураторів потоку.
2. Для струменево-нішових пальникових модулів з нішовими порожнинами різної форми (прямокутними та трапецієподібними) виявити закономірності

займання та зриву горіння щодо спалювання різних газів у широкому діапазоні зміни режимних та конструктивних параметрів.

3. Встановити ефекти впливу параметрів паливорозподілу на пускові характеристики струменево-нішового модуля та визначити області їх рекомендованих значень.
4. Обґрунтувати концепцію модульного принципу конструювання пальникових пристроїв на основі струменево-нішової системи за результатами дослідження робочих процесів системи пальникових модулів.
5. На основі CFD моделювання дослідити аеродинамічну структуру течії та особливості теплообміну у системах охолодження струменево-нішових пальників з обдувом внутрішніх поверхонь модулів полум'я струменями газу.
6. Виконати порівняльний аналіз основних характеристик робочих процесів пропонуваніх і традиційно застосовуваних пальників у складі різних вогнетехнічних об'єктів та встановити енергетичну ефективність заміни штатних пальників на пропоновані.

Об'єкт дослідження: теплофізичні процеси у пальникових пристроях на базі струменево-нішових систем.

Предмет дослідження: характеристики робочих процесів пальникових пристроїв зі струменево-нішовими системами щодо загальних закономірностей сумішоутворення палива і окислювача, стабілізації полум'я, вигорання палива тощо.

Методи дослідження. При вирішенні сформульованих вище завдань використовувались експериментальні методи дослідження процесів горіння та методи комп'ютерного моделювання із застосуванням програмного пакета ANSYS FLUENT. Експериментальні дослідження проводились на лабораторних стендах та на натурних об'єктах за наявними методиками.

Наукова новизна

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

2. Уперше виконано порівняльний аналіз характеристик займання та зриву горіння для струменево-нішових пальникових модулів пальників з нішовими порожнинами різної форми та розмірів; виявлено роль структураторів потоку у підвищенні стабілізуючих властивостей модулів з трапецієподібними нішами; розроблено підхід до визначення характеристик пускових режимів для струменево-нішової системи з прямокутною нішою; за результатами аналізу ефектів впливу геометричних параметрів розподілу палива на режимі бідного зриву модуля з прямокутною нішою встановлено діапазони раціональних значень цих параметрів для умов спалювання різних газів.

3. 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.

4. 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.

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

Практичне значення отриманих результатів. Результати виконаних досліджень впроваджено більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктах в Україні, Білорусі, Росії, Польщі, Казахстані (котли, печі, сушарки тощо.). Сертифіковано більше 100 типів і моделей розроблених пальникових пристроїв в ДП «Сертифікаційний випробувальний центр», отримано право встановлення розроблених пальникових пристроїв на котлах Монастирищенського, Бійського, Дорогобужського та інших котельних заводів. Міністерством житлово-комунального господарства України рішенням науково-технічної ради №16 від 26.10.2010р. рекомендовано впровадження енергоощадної струменево-нішової технології на об'єктах комунального господарства України.

Використання результатів роботи підтверджуються відповідними актами впровадження в комунальній теплоенергетиці, металургії, будівельній, хімічній та сільськогосподарській галузях.

Особистий внесок здобувача. Принципові і основні результати дисертації отримані автором особисто. В роботах, опублікованих у співавторстві, пошукачеві належить провідна роль у визначенні наукового напрямку проведення досліджень, постановці завдань, а також у проведенні циклу експериментальних досліджень і впровадженні результатів роботи.

Достовірність отриманих наукових результатів роботи. Обґрунтованість наукових положень і висновків базується на аналізі значного обсягу результатів теоретично-розрахункових досліджень та фізичного експерименту, а також на порівнянні отриманих результатів з опублікованими даними. Достовірність отриманих даних ґрунтується на коректному використанні положень теорії горіння і тепломасопереносу та їх порівнянні з результатами числових досліджень.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися на конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування», Харків, 2005р.; 2013р.; 2018р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Энергоэффективность крупного промышленного оборудования», Донецьк, 2004р., 2006р., 2008р., 2010р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми промислової теплотехніки», Київ, 2004р., 2006р., 2008р., 2010р.; Міжнародна науково-технічна конференція «UKR-POWER», Ялта 2005р., 2006р., 2007р., 2008р., 2009р., 2010р., 2011р., 2012р., 2013р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Металлургическая теплотехника», Дніпропетровськ,

2003р., 2006р., 2009р., 2012р.; VI Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Алушта, 2008р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Удосконалювання турбоустановок методом математичного і фізичного моделювання», Харків, 2000р., 2003р.; Міжнародна конференція «Украина – Россия – Сколково. Единое инновационное пространство», Київ, 2013р.; Міжнародна науково-практична конференція «Повышение эффективности энергетического оборудования», Москва, 2010р., 2013р.; Міжнародна конференція «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики», Ялта, 2012р.; VI Міжнародна науково-практична конференція «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», Москва, 2012р.; Всеросійська науково-практична конференція «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем», Москва, 2010р.; Мінський міжнародний форум з тепло- і масообміну, Мінськ, 2010р., 2017р.; Науково-практичний семінар з міжнародною участю «Экономическая безопасность и научно-технологические аспекты её обеспечения», Київ, 2011р., 2015р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність-2010», Київ, 2010р.; Міжнародна науково-практична конференція «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку», Київ, 2015р., 2017р.; Міжнародний східно-європейський форум «Інноваційна економіка і наука», Київ, 2016р.; Міжнародний конгрес «Інноваційні та технічні аспекти реформування житлово-комунального господарства», Київ, 2010р., 2011р., 2012р., 2013р., 2014р., 2015р., 2016р., 2017р., 2018р.; Міжнародний металургічний форум «Наука та інновації», Київ, 2017р.; III Міжнародна конференція «AdMet 2018», Львів, 2018р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасність. Енергоефективність. Технології», Рівне, 2015р., 2016р., 2017р., 2018р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 54 друкованих працях, зокрема: у 1 монографії; 2 статтях, що входять до наукометричної бази Scopus; 14 статтях, що входять до інших наукометричних баз; 2 статтях у закордонних виданнях; 15 статтях у спеціалізованих фахових виданнях; 11 статтях в інших виданнях; 2 публікаціях в матеріалах міжнародних конференцій в Україні і за кордоном; 3 патентах на винаходи і 4 патентах на корисну модель.

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, обґрунтовано: наукову новизну, теоретичну і практичну цінність одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено інформацію щодо апробації, структури і обсягу дисертації.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу стану проблеми, яка розглядається. 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. Христіча, Г.М. Любчика, І.Я. Сігала, А.І. Карпа, Б.С. Сороки, О.Е. Еринова, В.Н. Крижановського та інших провідних фахівців.

Наявні роботи, однак, не задовольняють зростаючі потреби енергетичної практики. Це стосується, насамперед, системних досліджень теплофізичних аспектів робочих процесів різних типів автономних палинкових модулів із застосуванням струменево-нішових систем. Подальшого розвитку потребують також дослідження робочих процесів систем, що складаються з кількох струменево-нішових палинкових модулів.

Огляд літературних джерел стосовно теплового стану палинкових пристроїв показав, що актуальними є дослідження їхніх систем охолодження. Виконаний аналіз засвідчив також необхідність розроблення технічних рішень і ефективних конструкцій палинків 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 особливості методики досліджень та методики математичного моделювання робочих процесів палинків зі струменево-нішовими системами. Наводяться описи експериментальних стендів, відповідної вимірювальної апаратури, а також оцінки похибок вимірювання досліджуваних величин. На рис. 1 наводиться фото експериментального стенду для дослідження характеристик робочого процесу струменево-нішових модулів.

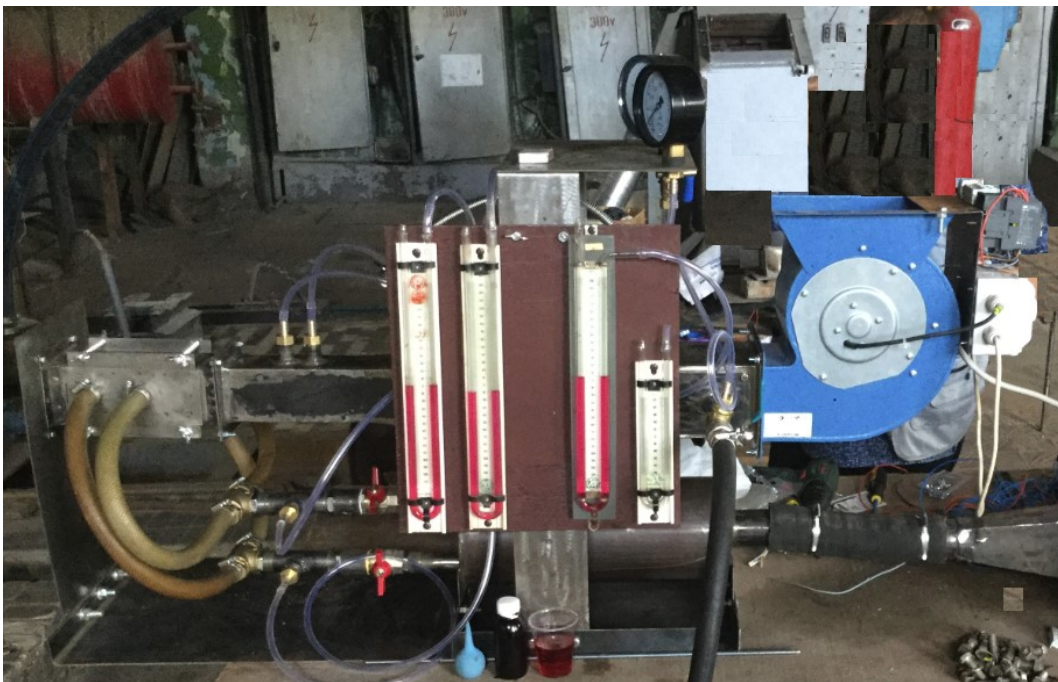


Рис. 1. Експериментальний стенд для дослідження характеристик робочого процесу струменево-нішових модулів

До основних застосовуваних методик відносяться методики експериментальних досліджень:

1. Структури течії з використанням термоанемометра, візуалізації течії підсвічуванням полум'я солями натрію, сажо-газовою візуалізації тощо.
2. Сумішоутворення палива і окиснювача за ізотермічних умов на основі газового аналізу.
3. Полів температур з використанням термопар, пірометрів і тепловізора.
4. Вигорання палива на основі газового аналізу продуктів згорання.
5. Характеристик сталого горіння і запалення.
6. Масообміну в нішовій порожнині на основі методу Лефевра.

Крім того використовувалась методика промислових випробувань пальникових пристроїв згідно зі стандартами підприємств.

Експериментальні дослідження проводилися в широкому діапазоні зміни конструктивних і режимних параметрів пальникових пристроїв: $B = (10...30) \cdot 10^{-3}$ м; $L = (10...40) \cdot 10^{-3}$ м; $H = (4...10) \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 2,0...6,0$; $d = (0,5...10) \cdot 10^{-3}$ м; $k_f = 0,15...0,6$; $W_{\text{п}} = 5...80$ м/с; $W_{\text{Г}} = 5,0...200,0$ м/с; $\alpha = 0,6...120$.

Математичне моделювання процесів переносу при дослідженні систем охолодження пальникових пристроїв струменево-нішового типу здійснювалось з використанням пакета FLUENT. Відповідна математична модель має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \nabla \cdot (S^*), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho I) + \nabla \cdot (\rho U I) = \nabla \cdot q_{\Sigma} + q_V, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho U Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

$$\rho = \frac{P}{RT \sum_i^N \frac{Y_i}{M_i}}, \quad (5)$$

де τ – час; U – вектор швидкості; P – статичний тиск; S^* – тензор напружень; ρ – густина; I – ентальпія; q_{Σ} – тепловий потік, що включає складові, пов'язані з теплопровідністю і турбулентними пульсаціями; q_V – джереловий член, що враховує теплоту хімічних реакцій і перенос теплоти випромінюванням; Y_i , M_i – масова концентрація та молекулярна маса i -ої компоненти; J_i – потік маси i -ої компоненти, зумовлений дифузією та турбулентним переносом; R_i – джереловий член, що враховує швидкість утворення i -ої компоненти; N – кількість компонент суміші; T – абсолютна температура; R – універсальна газова стала.

У роботі виконано верифікацію моделі турбулентності, за результатами якої показано, що розглянутій ситуації найбільшою мірою відповідає RNG k - ϵ модель турбулентності.

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

В рамках досліджень для струменевих модулів – модуля з уступом і модуля з торцевою нішою – вивченню підлягали закономірності течії, сумішоутворення палива і окиснювача та формування теплового стану стінок модуля. На рис. 2 як приклад наводяться результати виконаних досліджень щодо далекобійності системи струменів для модуля з уступом у порівнянні з відповідною ситуацією за відсутності уступу та поодинокого струменя. Згідно з одержаними даними наявність уступу призводить до деякого збільшення дальності струменів.

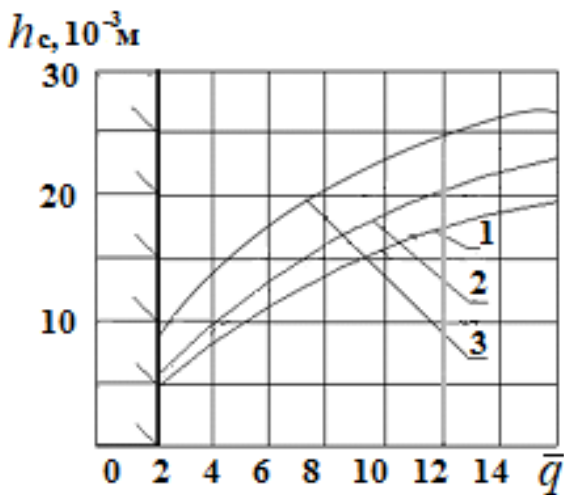


Рис. 2. Залежність далекобійності струменів h_c у зносячому потоці від гідродинамічного параметра для струменевого модуля з уступом (2), за відсутності уступу (1) та для поодинокого струменя (3) при $\bar{S} = 3,0$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $B = 20 \cdot 10^{-3}$ м.

В роботі виконано також дослідження щодо впливу відстані L_1 між зривною кромкою паливного модуля та газоподавальними отворами на формування зон циркуляційних течій за уступом та системою струменів. За результатами досліджень показано, що злиття вказаних зон у спільну циркуляційну зону (що є сприятливим для стійкості горіння) має місце при значеннях $L_1 < 0,015$ м.

На рис. 3, 4 для прикладу наведено результати експериментів з дослідження характеристик сумішоутворення палива і окиснювача стосовно струменевого модуля з торцевою нішою та модуля з уступом. З аналізу залежності: $\bar{\alpha} = f(\bar{S})$ для модуля з торцевою нішою випливає, що для забезпечення концентраційних меж запалення паливної суміші відносний крок \bar{S} розташування газоподавальних отворів має становити 2,0...4,5 для отворів діаметром $(1,0...10,0) \cdot 10^{-3}$ м та 2,0...12,0 для отворів діаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Результати виконаних досліджень закономірностей змішування палива і окиснювача для струменевого модуля з уступом (рис. 3) свідчать, що в зоні циркуляційної течії за системою струменів паливна суміш відповідає концентраційним межам запалення в усьому розглянутому діапазоні зміни гідродинамічного параметра \bar{q} . При цьому в області $0,5 < \bar{q} < 2,0$

спостерігається перезбагачення паливної суміші, що є наслідком прояву ефекту Коанда, пов'язаного з приєднанням струменів до поверхні паливного модуля.

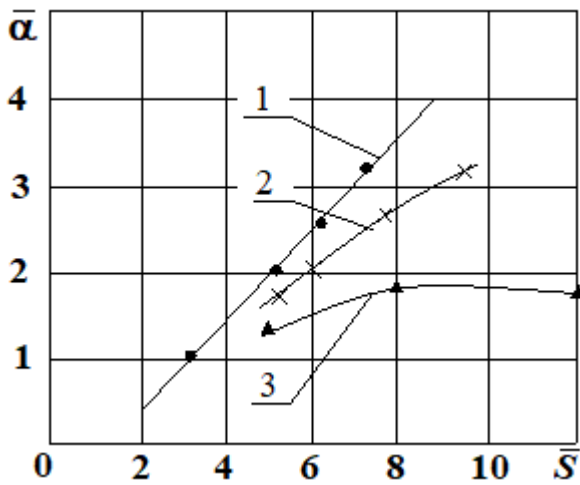
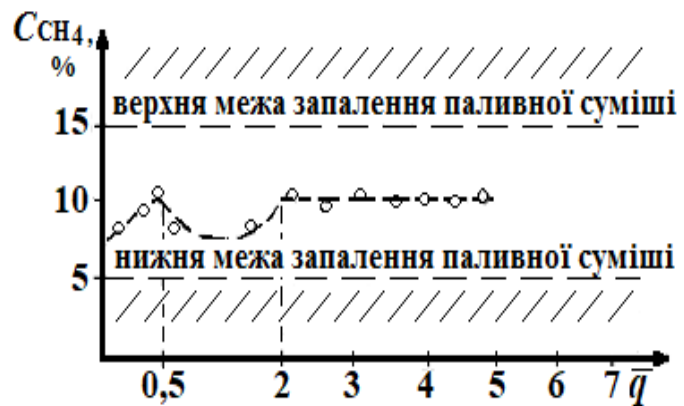


Рис. 4. Залежність середнього значення концентрації метану C_{CH_4} в зоні циркуляційної течії за системою паливних струменів від гідродинамічного параметра \bar{q} при $B = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $W_{\Pi} = 20,0$ м/с.



Одержані дані експериментів з дослідження температурних режимів струменевих паливних модулів показали, що при застосуванні схеми подачі природного газу у внутрішню порожнину модуля перед його надходженням на спалювання забезпечуються допустимі рівні температур стінок цих модулів (рис. 5).

В роботі для струменево-нішових паливних модулів з прямокутною приструменевою нішою – зручнообтічного модуля і модуля з торцевою порожниною – виконано дослідження структури течії, сумішоутворення, стабілізації полум'я та вигорання палива. Особлива увага приділялася вивченню закономірностей перебігу досліджуваних процесів у області прямокутної нішової порожнини. Для прикладу на рис. 6, 7 наведено результати експериментів щодо характеристик течії і сумішоутворення в цій області. Згідно з одержаними даними зі збільшенням швидкості газу W_{Γ} поверхні нульової швидкості в нішовій порожнині зміщуються в напрямку основного потоку, що відповідає підйому основного нішового вихора від дна ніші (рис. 6). Отримані результати свідчать також про те, що полум'я, стабілізуючись у нішовій порожнині, розповсюджується від газоподавальних отворів вниз за потоком під осями газових струменів. При цьому межа факелу розміщується поблизу ізотерми 700 °С (рис. 7).

Рис. 3. Залежність середнього значення коефіцієнта надлишку повітря $\bar{\alpha}$ в зоні циркуляційної течії за системою паливних струменів від відносного кроку \bar{S} розташування газоподавальних отворів при $B = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{q} = 12$; $W_{\Pi} = 10,0$ м/с для різних значень діаметру отворів d : 1 – $d = (1 \dots 10) \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $0,7 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Рис. 5. Схема подачі природного газу та розподіл температури вздовж зовнішньої поверхні пального модуля з торцевою нішою (а) та модуля з уступом (б) при $B = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $\bar{q} = 12,0$; $L_1 = 30 \cdot 10^{-3}$ м; $W_{\Pi} = 10,0$ м/с.

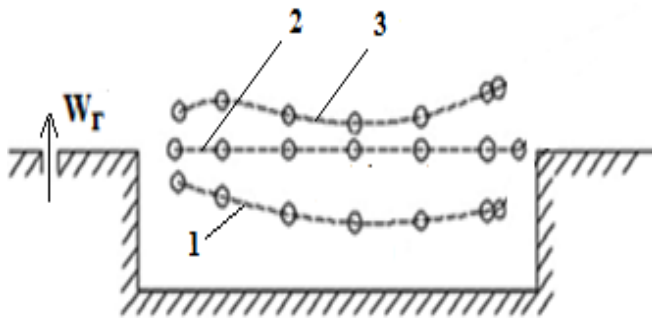
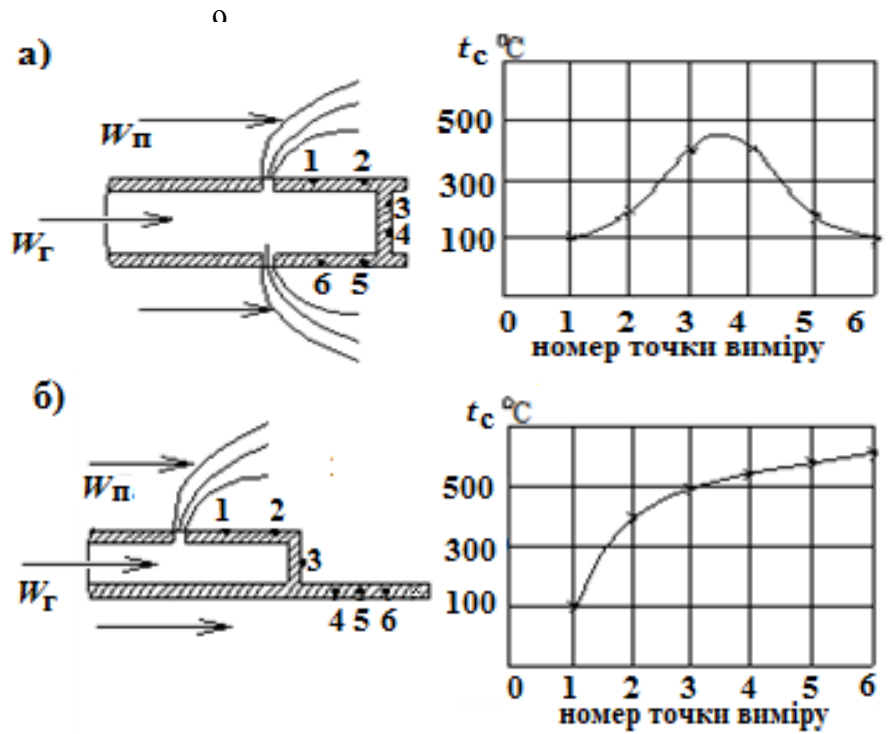


Рис. 6. Положення ліній нульової швидкості у поздовжньому перерізі нішової порожнини при $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $W_{\Pi} = 20,0$ м/с для різних значень швидкості газу W_G : 1 – $W_G = 0$; 2 – 120,0 м/с; 3 – 240,0 м/с.

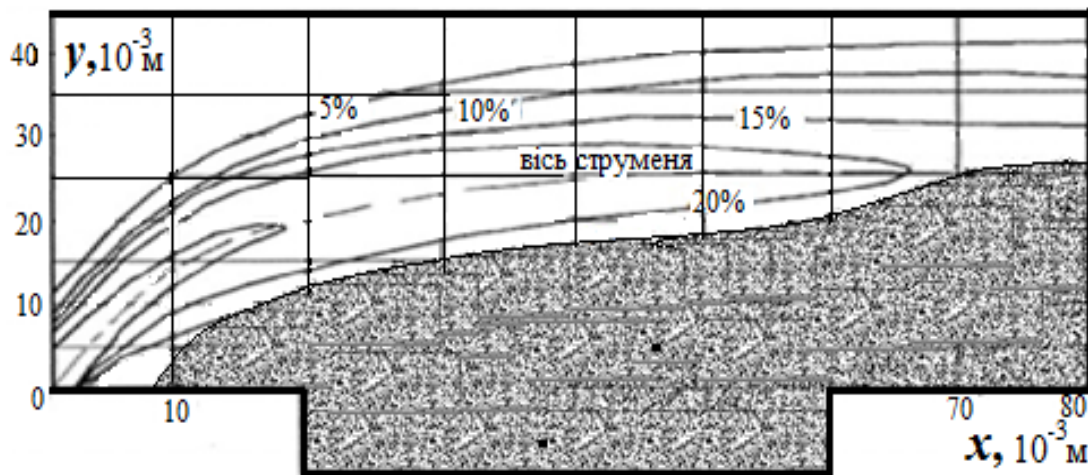
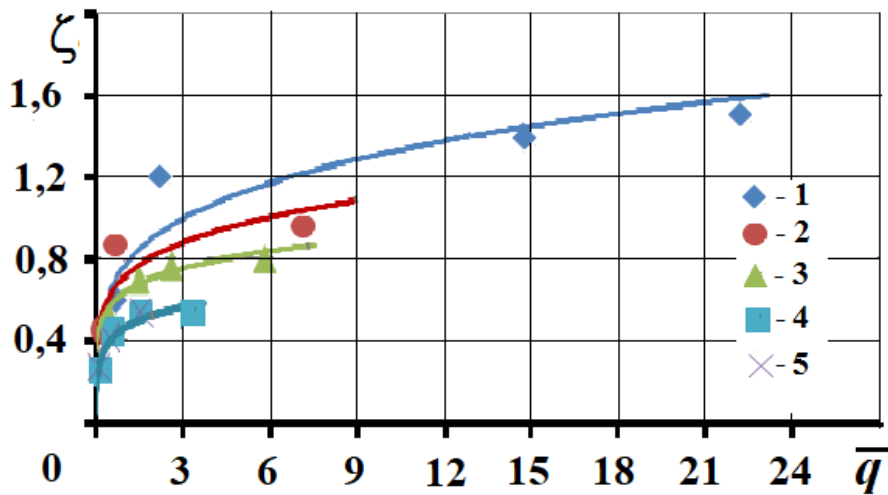
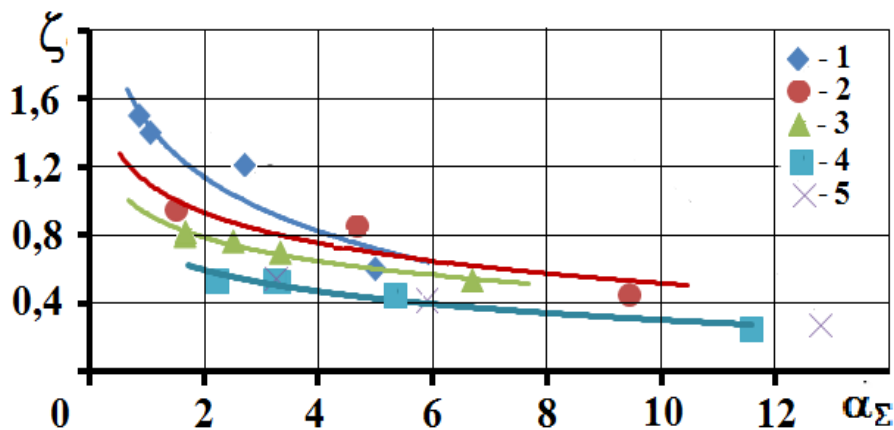


Рис. 7. Поля об'ємної концентрації метану і зона факела (затемнена область) при $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{q} = 12,0$; $W_{\Pi} = 20,0$ м/с.

Рисунок 8 ілюструє дані виконаних експериментальних досліджень щодо гідравлічного опору струменево-нішової системи з прямокутною нішовою порожниною. За результатами досліджень показано, що в широкому діапазоні зміни швидкості повітря (4,0...18,8 м/с) відносні гідравлічні втрати ζ в умовах, які розглядаються, є порівняно невеликими.



а)



б)

Рис. 8. Залежність відносних гідравлічних втрат ζ в каналі зі струменево-нішовою системою від гідродинамічного параметру \bar{q} (а) та загального коефіцієнта надлишку повітря α_{Σ} (б) при $H_k = 72 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м за умов горіння для різних значень швидкості повітря: 1 – $W_{\Pi} = 4,0$ м/с; 2 – 8,0 м/с; 3 – 9,8 м/с; 4 – 17,0 м/с; 5 – 18,8 м/с.

Виконані експериментальні дослідження з порівняльного аналізу стійкості горіння в паливних модулях з торцевими нішами за наявності та відсутності прямокутної приструменевої ніші показали, що завдяки стабілізуючим властивостям даної ніші має місце суттєве розширення діапазону стійкого горіння у бік бідного зриву. На рис. 9 як приклад наведено зривні характеристики для двох вказаних ситуацій. Згідно з представленими даними за наявності нішової порожнини $(40 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м при $W_{\Pi} = 20,0$ м/с значення коефіцієнту надлишку повітря бідного зриву збільшується з 70 до 110.

За результатами виконаних досліджень інтенсивності вигорання палива в паливних модулях з прямокутною приструменевою нішою встановлено, що вказана інтенсивність є суттєво вищою у порівнянні з ситуацією струменево-нішової системи на гладкій поверхні. Відповідно довжина факела у паливному модулі значно скорочується. У досліджуваному діапазоні зміни визначальних параметрів процесу вона зменшувалась у 1,5...2,0 рази. На рис. 10 наведено характерні дані щодо інтенсивності вигорання палива для модуля з прямокутною приструменевою і торцевою нішою. Як видно, довжина факелу l_{ϕ} для ситуації, що розглядається, становить лише 0,65 м.

Рис. 9. Зривні характеристики паливних модулів з торцевими нішами за наявності (1) та відсутності (2) приструменевої порожнини при $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $B = 25 \cdot 10^{-3}$ м.

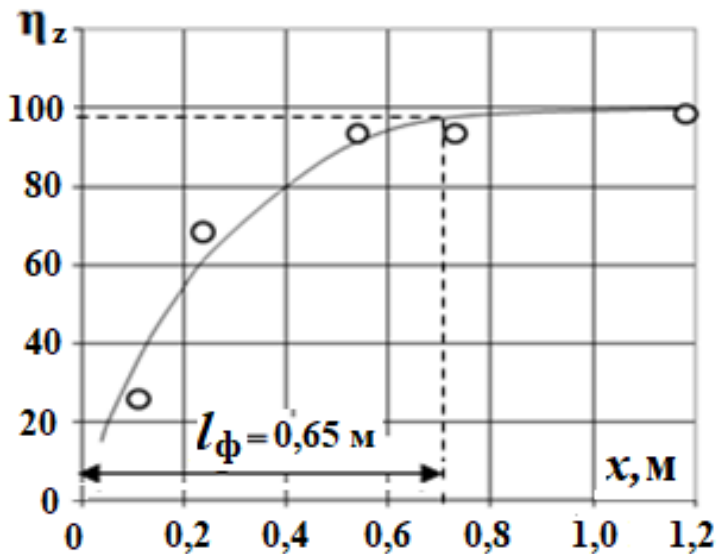
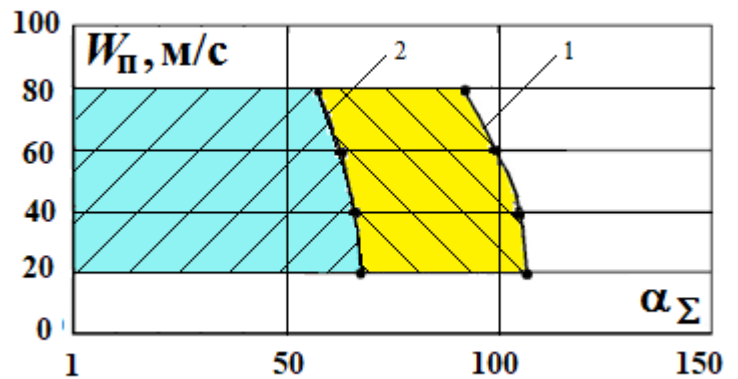


Рис. 10. Повнота вигорання палива η_z за довжиною каналу для модуля з прямокутною приструменевою і торцевою нішою при $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $W_{п} = 20,0$ м/с; $\alpha = 1,05$.

В роботі 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. Зокрема, за результатами візуалізації обтікання нішових порожнин повітряним потоком різними методами (сажо-газової візуалізації, підсвічування полум'я солями натрію, застосування світних деревних частинок) показано, що у нішах трапецієвидної форми у порівнянні з прямокутними нішовими порожнинами має місце погіршення умов вихроутворення. При цьому для

кутів нахилу бічних стінок ніші більш ніж 60° основний нішовий вихор практично зникає. Застосування спеціального структуратора потоку, встановленого на передній за течією кромці ніші, сприяє формуванню у нішовій порожнині вихрових структур, які забезпечують надійну стабілізацію полум'я. Як показали результати виконаних досліджень, встановлення структураторів потоку призводить також до деякого зниження інтенсивності турбулентності у нішовій порожнині (рис. 11).

За результатами досліджень гідравлічних втрат при обтіканні ніш різної конфігурації з боку газового тракту у складі паливкового модуля встановлено, що вказані втрати є дещо нижчими для ніш трапецієвидної форми порівняно з прямокутними нішами (табл. 1). Так, для трапецієвидних ніш з кутом нахилу бічних стінок 45° гідравлічні втрати за газовим трактом приблизно на 20% менші, ніж для прямокутної ніші в усьому досліджуваному діапазоні зміни числа Рейнольдса ($2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$).

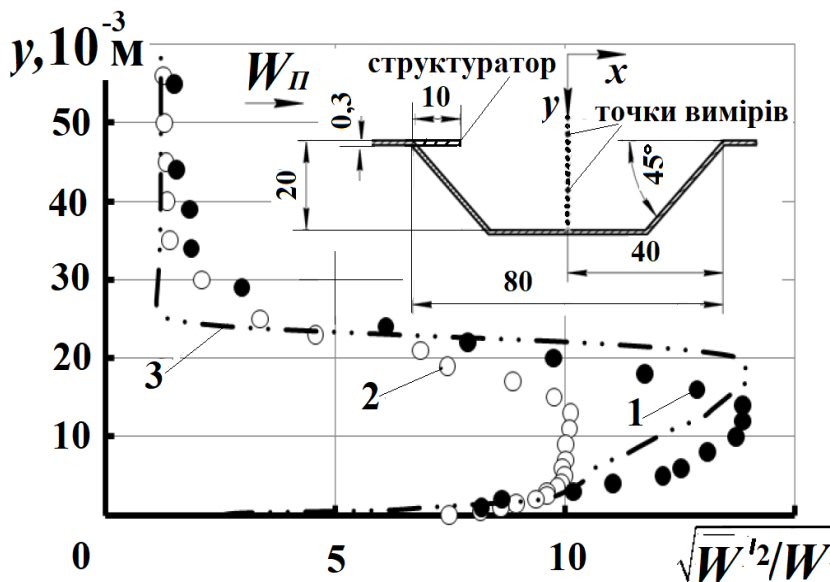





Рис. 11. Розподіл інтенсивності турбулентності за висотою трапецієвидної нішової порожнини при $W_{\Pi} = 18,0$ м/с; $L_3 = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 1, 2 – результати експериментів за відсутності та наявності структураторів потоку; 3 – дані CFD моделювання для ніші без структуратора.

Таблиця 1.

Абсолютні ξ_0 і відносні ξ/ξ_0 значення коефіцієнтів місцевих гідравлічних втрат при внутрішньому обтіканні прямокутної ніші та трапецієвидних ніш з кутом нахилу бічних стінок 45° .

Re_{Γ}		$2 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
ξ_0		3,25	3,01	2,88	2,86
ξ/ξ_0		0,95	0,94	0,93	0,93
		0,78	0,79	0,8	0,8

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 значення відносного кроку \bar{S} розташування газоподавальних отворів.

Четвертий розділ присвячено, головним чином, дослідженням закономірностей стабілізації полум'я у власне струменево-нішових системах та пальниках на основі застосування таких систем. Щодо вказаних систем, в яких циркуляційні течії в нішових порожнинах слугують джерелом стабілізації полум'я, то тут вивченню підлягали системи з прямокутними нішами. Для цих систем за результатами виконаних досліджень запропоновано експериментально-розрахунковий підхід до вивчення характеристик бідного зриву. Згідно з розробленим підходом відповідна узагальнювальна залежність має вигляд

$$\alpha_{\Sigma}^3 = A^{-0,75} \left[\frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{(1/\alpha_{\text{H}} + L_0 \cdot n) \cdot c_p \cdot \Delta T} - \frac{W_{\text{II}}^{1,9}}{(100 - W_{\text{II}})^{0,65}} \right], \quad (6)$$

де $A = 3,5 + n$; n – параметр, що характеризує масообмін між нішою та основним потоком; α_{H} – середнє значення коефіцієнту надлишку повітря у нішовій порожнині за умов бідного зриву; $\Delta T = T_3 - T_{\text{ПС}}$; T_3 , $T_{\text{ПС}}$ – температура займання палива та початкова температура паливної суміші; Q_{H}^{P} – нижча теплота згоряння палива; c_p – питома масова теплоємність.

Значення параметра n , що фігурує в залежності (6), визначалося в результаті спеціальних експериментальних досліджень масообміну між основним потоком і циркуляційною течією в ніші за умов бідного зриву полум'я. Експерименти проводилися згідно з методикою Лефевра. За результатами виконаних досліджень одержано залежність для визначення відношення витрат повітря G_{II}^{H} , що надходить у зону циркуляційної течії у нішовій порожнині, до відповідних витрат G_{II} основного потоку

$$n = \frac{G_{\text{II}}^{\text{H}}}{G_{\text{II}}} = m \left(\frac{H}{H_{\text{K}}} \right)^{1,1}, \quad (7)$$

де $m = f\left(\frac{H}{L}\right)$.

Результати проведених досліджень показали, що величина n не залежить від швидкості основного повітряного потоку і визначається лише геометричними характеристиками нішової порожнини та висотою каналу.

Щодо величини α_{H} , яка входить до залежності (6), то вона визначалася на основі рівняння теплового балансу для ніші, виходячи з умов теплової стабілізації факела в припущенні, що паливо, яке надходить у нішову порожнину, повністю згорає в її межах

$$\alpha_{\text{H}} = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot c_p \Delta T}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} - L_0 \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot n \cdot c_p \Delta T}. \quad (8)$$

На рис. 12 наведено характеристики бідного зриву для різних паливних газів за результатами експериментів та даними, що відповідають пропонованій залежності (6).

В роботі виконано комплекс досліджень характеристик займання та зриву горіння для струменево-нішових модулів з нішовими порожнинами різної конфігурації – прямокутними і трапецієвидними за наявності та відсутності структураторів потоку. Отримано результати експериментальних досліджень для модулів з прямокутними нішами в широкому діапазоні зміни їхніх геометричних параметрів стосовно умов спалювання природного газу і пропан-бутану. На рис 13 для прикладу наведено відповідні дані для ситуації спалювання природного газу.

Рис. 12. Характеристики бідного зриву для струменево-нішової системи з прямокутною нішою $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $H_K = 72 \cdot 10^{-3}$ м для різних паливних газів за даними експериментів: 1 – пропан-бутан; 2 – метан; 3 – генераторний газ; суцільні лінії – результати розрахунків за залежністю (6).

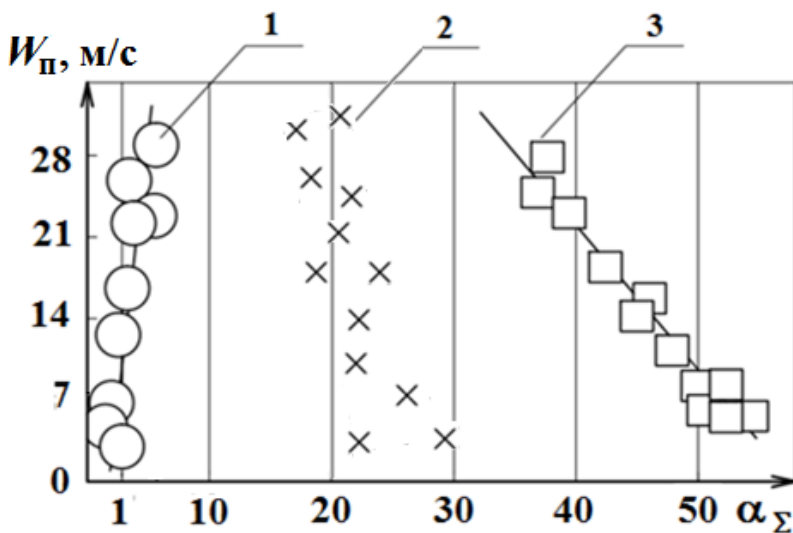
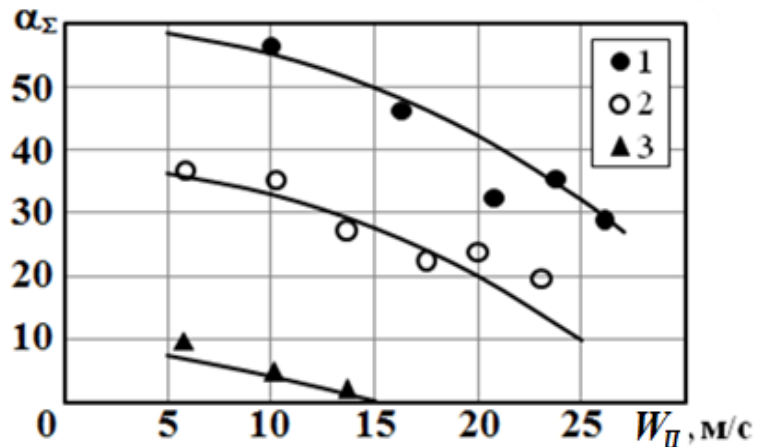


Рис. 13. Зривні характеристики струменево-нішового паливкового модуля з прямокутною нішою при $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,4$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; 1, 3 – межі багатого і бідного зриву; 2 – межі області електроіскрового запалення горючої суміші.

У таблиці 2 представлено результати порівняння умов займання і бідного зриву при спалюванні природного газу і пропан-бутану. Згідно з одержаними даними для вказаних паливних газів відношення витрат палива на режимах займання і бідного зриву зменшується зі збільшенням швидкості повітря. При цьому дане відношення зростає при зменшенні розмірів нішової порожнини і є дещо більшим для умов спалювання пропан-бутану в порівнянні з природним газом.

Певна увага в роботі приділена дослідженням впливу конфігурації нішової порожнини на характеристики займання і бідного зриву. За результатами виконаних досліджень встановлено, що форма ніші спричиняє суттєвий вплив на вказані

характеристики. Так, для паливних модулів з прямокутними нішами межі займання і бідного зриву є більш широкими, ніж для трапецієвидних ніш (рис. 14). Щодо останньої ситуації, то тут вказані межі значно зменшуються при збільшенні кута нахилу бічних стінок ніші. Як видно з рис. 14, для кута 60° запалення виникає тільки при швидкостях повітря, що перевищують $15,0$ м/с. Згідно з одержаними даними стабілізаційні властивості струменево-нішових модулів суттєво залежать також від об'єму нішової порожнини і у досліджуваних межах погіршуються з його збільшенням.

Таблиця 2.

Відношення витрат палива в режимах займання і бідного зриву для паливного модуля з прямокутною нішою різних розмірів при $\bar{S} = 3,5$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м

L/H	40/10	20/5	40/10	20/5
$W_{п}, \text{м/с}$	Природний		Пропан-бутан	
Газ	Природний		Пропан-бутан	
4,5	1,64	2,2	1,87	2,53
9,0	1,55	2,27	1,61	2,45
14,0	1,29	2,25	1,27	2,4
20,5	1,13	1,4	1,2	1,63
25,0	1,09	1,32	1,16	1,5

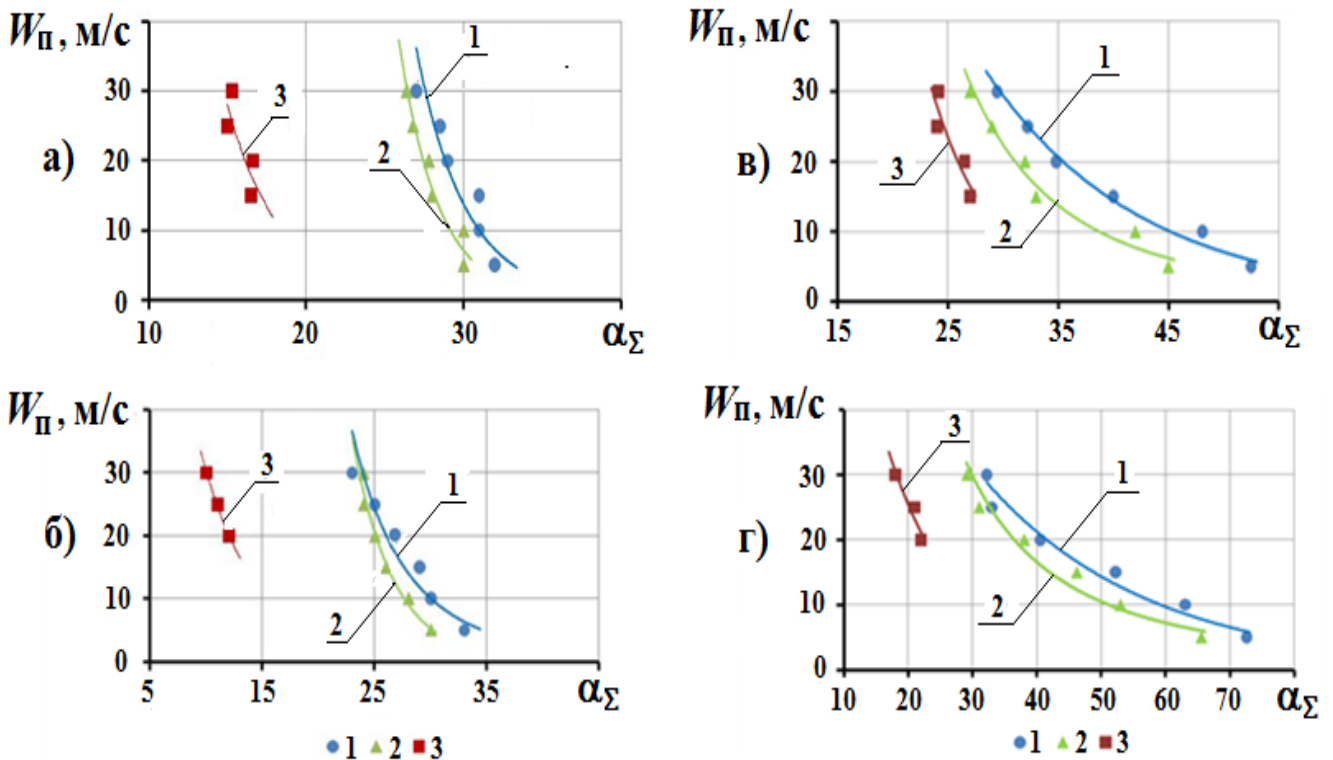


Рис. 14. Характеристики займання (а), (б) і бідного зриву (в), (г) для паливних модулів з прямокутною нішою (1) і трапецієвидними нішами, з кутом нахилу бічних стінок 45° (2) та 60° (3).

Результати виконаних експериментальних досліджень показали, що стабілізаційні властивості пальників з трапецієвидними нішами можуть бути суттєво покращені при встановленні структураторів потоку на передній за течією стінці ніші.

Рисунок 15 ілюструє одержані дані щодо характеристик бідного зриву для трапецієвидних ніш за наявності і відсутності структураторів потоку. Як видно із зіставлення наведених даних, довжина структуратора може помітно впливати на вказані характеристики. Так, у розглянутих умовах кращі стабілізаційні властивості модуля забезпечуються при довжині структуратора $L_3 = H/2$.

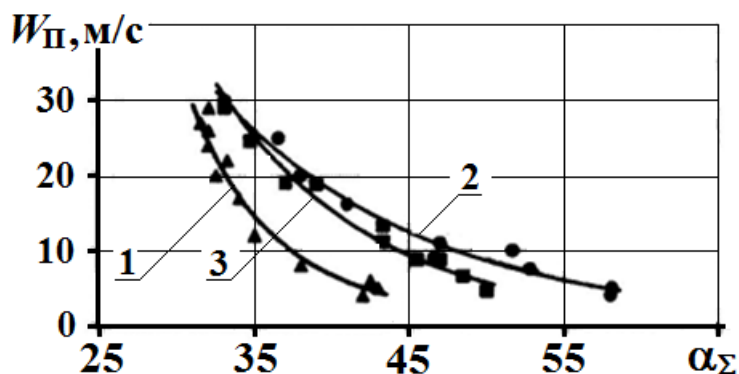


Рис. 15. Характеристики бідного зриву для модуля з трапецієвидною нішою за відсутності (1) і наявності (2), (3) структуратора потоку довжиною $L_3 = H/2$ і $L_3 = H$ при $L/H = 20/5$, куті нахилу бічної стінки 45° , $\bar{S} = 3,5$; $d_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Для умов спалювання природного газу та пропан-бутану в роботі на основі статистичних методів планування експерименту і аналізу функції відгуку загального коефіцієнта надлишку повітря у струменево-нішових модулях з прямокутною нішою визначено ефекти взаємного впливу геометричних параметрів паливорозподілу на режимах запалення і бідного зриву. Одержано відповідні регресійні залежності для визначення пускових та зривних меж. Для ситуації використання пропан-бутану вказані залежності мають вигляд

$$\alpha_\Sigma = 21,7 - 0,7d - 0,6L_1 - 2,74\bar{S} + 1,1d^2 + 0,03L_1^2 + 0,73\bar{S}^2 - 0,05L_1\bar{S} + 4,7d\bar{S} \quad (9)$$

$$\alpha_\Sigma = 45,5 - 6,3d - 0,6L_1 - 4,6\bar{S} + 1,8d\bar{S}. \quad (10)$$

Результати визначення оптимальних геометричних параметрів паливорозподілу на режимах запалення і бідного зриву за аналізом отриманих регресійних залежностей показали, що вказані параметри можуть суттєво відрізнитися для природного газу та пропан-бутану і становлять відповідно $d = (1,3 \dots 2,0) \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 1,5 \dots 1,7$ та $d = (45 \dots 5,0) \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 4,5 \dots 5,0$. При цьому діапазон зміни відстані L_1 від газоподавальних отворів до зривної кромки модуля в обох випадках є однаковим $L_1 = (5,0 \dots 7,0) \cdot 10^{-3}$ м.

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 встановлено факт суттєвого скорочення довжини факела в системі модулів у порівнянні з поодиноким модулем.

Показано також, що інтенсивність вигорання палива для системи струменево-нішових модулів з прямокутною нішою виявляється дещо вищою, ніж для відповідної системи струменевих модулів з торцевою нішою на початковій стадії розвитку факела (рис. 16).

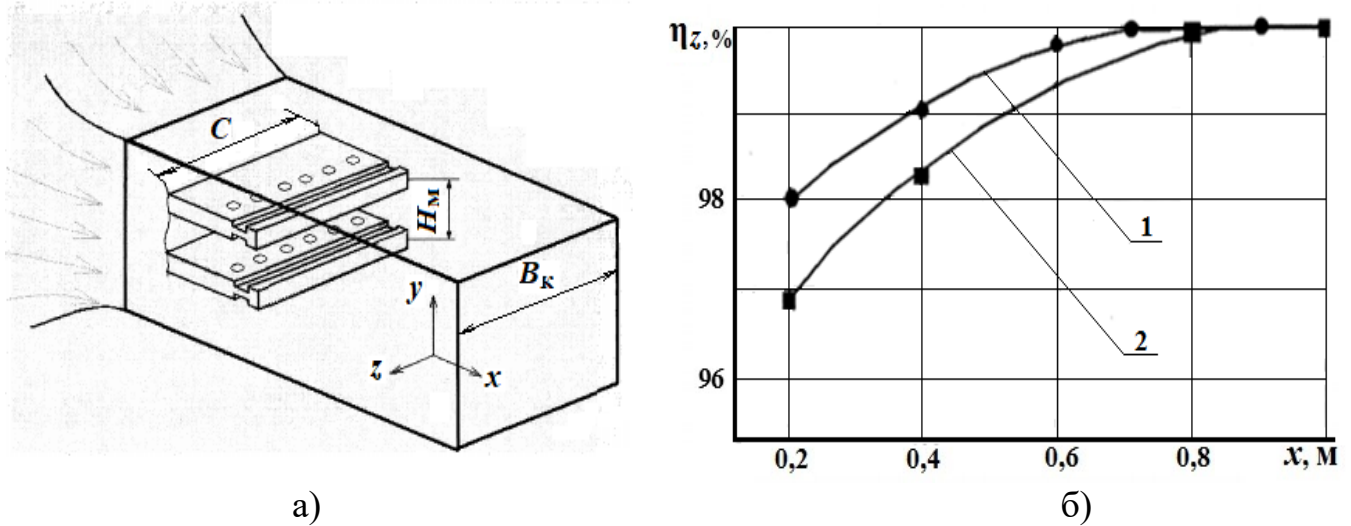


Рис. 16. Схема системи з двох струменево-нішових модулів з прямокутною нішою (а) та повнота вигорання палива η_z по довжині каналу (б) для даного модуля (1) та відповідного струменевих модулів з торцевою нішою (2) при $L = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $W_{\Pi} = 20,0$ м/с; $\alpha = 1,05$.

Згідно з результатами досліджень процесів горіння в системі з двох струменево-нішових модулів, проведених в широкому практично важливому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку повітря ($\alpha = 1 \dots 100$) та його швидкості ($W_{\Pi} = 16,0 \dots 25,0$ м/с), встановлено, що форма і геометричні характеристики факела полум'я є практично однаковими за обома модулями. При цьому останні визначаються, головним чином, величиною коефіцієнта надлишку повітря при несуттєвій залежності від його швидкості (рис. 17).

Для системи, яка складається зі зручнообтічних модулів, виконано дослідження щодо аналізу впливу коефіцієнта загромодження прохідного перерізу каналу k_f на характеристики процесу горіння. Показано, зокрема, що збільшення величини k_f призводить до скорочення факела та підвищення інтенсивності вигорання палива. Як свідчать дані, наведені на рис. 18, при збільшенні k_f від 0,15 до 0,5 повнота вигорання палива η_z зростає на 5,0% на відстані 0,2 м за модулями по потоку.

За результатами проведених досліджень, що свідчать про практичну ідентичність процесу горіння за окремими модулями, які входять до системи модулів, зроблено висновок про доцільність застосування модульного принципу при конструюванні пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем.

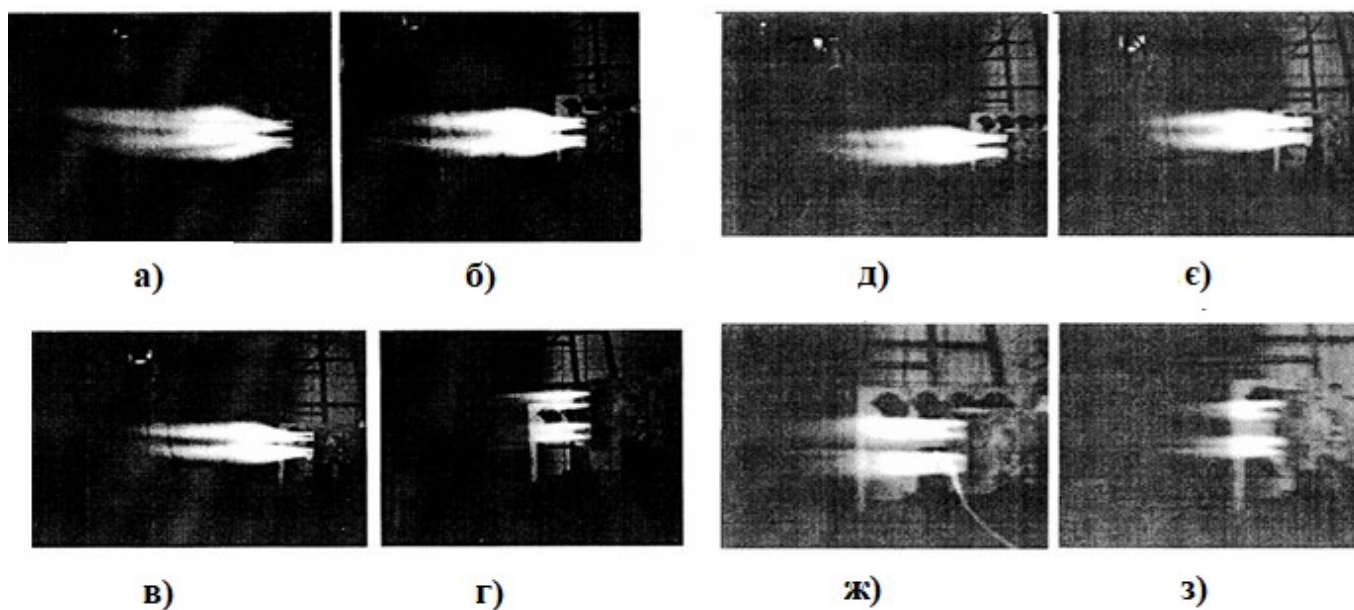


Рис. 17. Фотореєстрація факела в системі з двох струменево-нішових модулів з прямокутною нішою при швидкостях повітря $W_{\Pi} = 16,0$ м/с (а, б, в, г); та $25,0$ м/с (д, е, ж, з) для $\alpha = 1,01$ (а), $1,54$ (б), $1,94$ (в), $10,0$ (г), $1,55$ (д), $2,0$ (е), $4,9$ (ж), $8,9$ (з) при $\bar{S} = 3,5$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м.

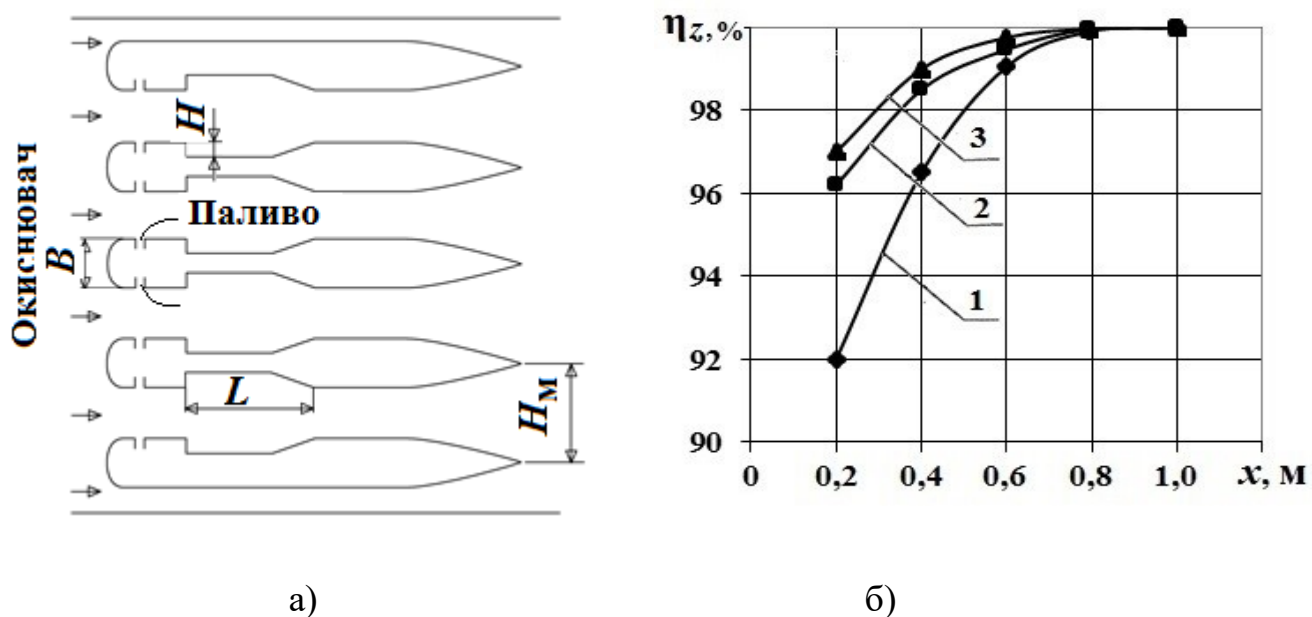


Рис. 18. Схема розташування зручнообтічних модулів в каналі (а) та повнота вигорання палива за системою таких модулів по довжині каналу (б) при різних значеннях коефіцієнта загромодження k_f : 1 – $k_f = 0,15$; 2 – $0,4$; 3 – $0,5$ для $L = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $B = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $W_{\Pi} = 20,0$ м/с; $\alpha = 1,05$.

Шостий розділ присвячено дослідженням на основі CFD моделювання течії та теплообміну в системах охолодження пальникових пристроїв на основі струменево-нішових конструкцій. Сутність пропонованих систем полягає в охолодженні стінок пальникових модулів природним газом, який спеціальним

чином подається в їхню внутрішню порожнину і далі, після виконання своїх функцій холодоагенту, надходить у газоподавальні отвори і використовується як паливо (рис. 19).

В роботі виконано дослідження ефективності застосування різних варіантів систем охолодження пальників струменево-нішового типу. Усі досліджувані системи охолодження характеризувалися наявністю струменевого обдуву внутрішньої торцевої поверхні модуля та поздовжнім обтіканням його бічних поверхонь паливним газом.

Для обдува торцевої поверхні застосовувалася система круглих імпульсних струменів або плоский імпульсний струмінь. Організація обтікання бічних поверхонь модуля здійснювалася на основі використання спеціальних дефлекторних конструкцій (рис. 20). Розгляду підлягали системи охолодження з направляючим прямим та заокругленим дефлектором і зі спеціально спрофільованими дефлекторами з прямим та заокругленим торцем.

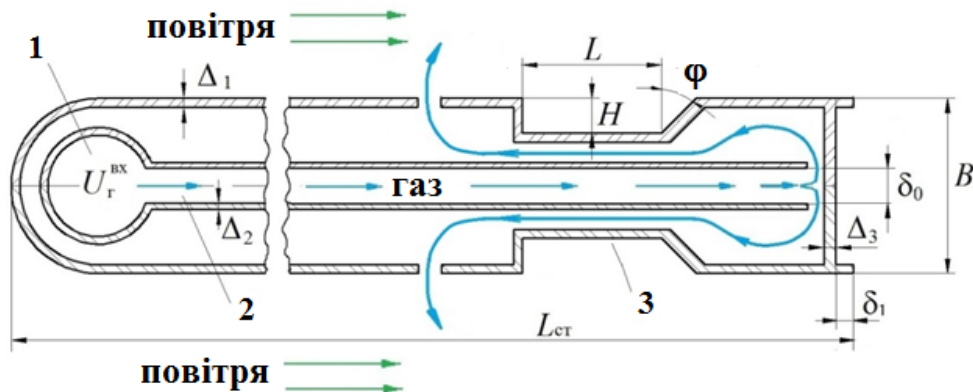


Рис.19. Схема системи охолодження струменево-нішового модуля з обдувом його торцевої поверхні плоским імпульсним струменем: 1 – газоподавальний колектор; 2 – канал для охолоджувального газу; 3 – нішова порожнина.

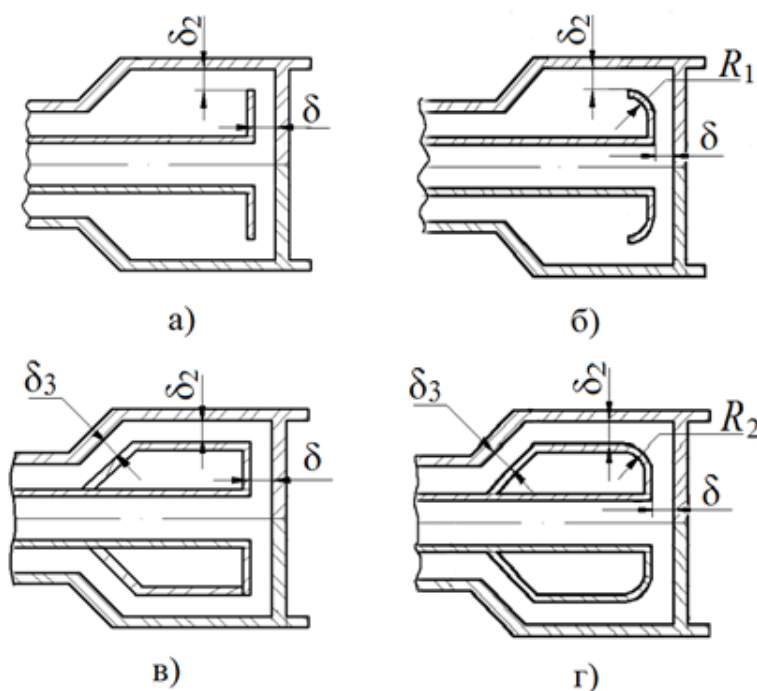


Рис. 20. Схеми торцевої зони систем охолодження з плоским імпульсним струменем і різними дефлекторними конструкціями: направляючий прямий (а), заокруглений (б) дефлектор; спеціально спрофільовані дефлектори з прямим (в) і заокругленим торцем (г).

Для прикладу на рис. 21 наведено картину ліній течії охолоджувального агента у поздовжньому перерізі модуля з різними дефлекторними конструкціями. Згідно з одержаними даними за умов відсутності спеціально спрофільованого дефлектора за направляючими дефлекторами утворюються вихрові структури, що значною мірою повторюють за формою спрофільований дефлектор.

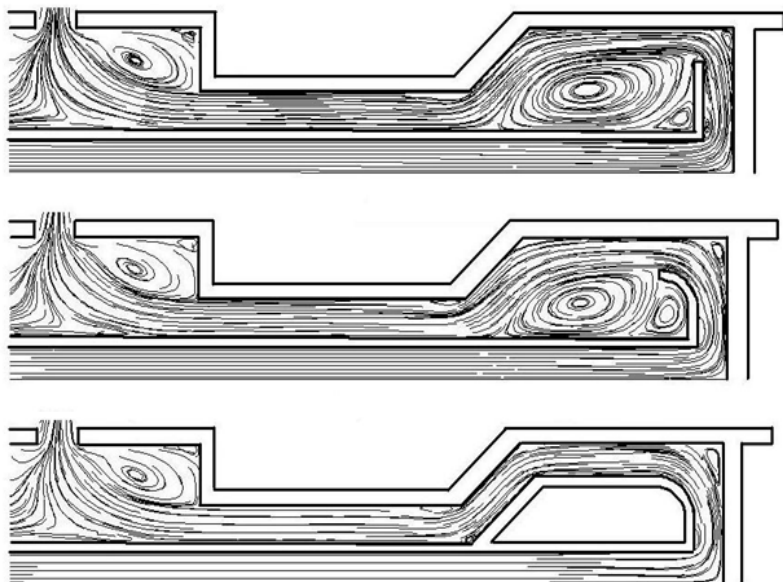


Рис. 21. Картина ліній течії газу в поздовжньому перерізі модуля, що проходить через вісь газоподавальних отворів, для систем охолодження з направляючим прямим (а) і заокругленим дефлектором (б) та спеціально спрофільованим дефлектором (в) з заокругленим торцем.

Щодо відмінностей у картинах течій, які зіставляються, то вони стосуються, насамперед, приторцевої зони модуля. А саме, у разі застосування направляючого і спеціально спрофільованого дефлекторів із заокругленим торцем розміри вихорів в кутових приторцевих зонах є помітно більшими. Крім того, при використанні прямого направляючого дефлектора помітно підвищуються швидкості газу поблизу бічної поверхні модуля в зоні, прилеглий до його торця. Вказані особливості течії охолоджувального газу визначають характер зміни числа Nu на внутрішній поверхні модуля при застосуванні різних дефлекторних конструкцій (рис. 22).

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.

Значна увага в роботі приділялася дослідженню ефективності систем охолодження палинкових модулів при різних навантаженнях котлоагрегату. Необхідність таких досліджень зумовлена тим, що зниження вказаного навантаження пов'язане зі зменшенням витрати охолоджувального агента (паливного газу), а отже і з погіршенням умов охолодження. Рисунок 23 ілюструє результати CFD моделювання щодо впливу навантаження котлоагрегату N на максимальне значення числа Nu на торцевій поверхні модулів різних розмірів при застосуванні систем охолодження з круглими і плоскими імпактними струменями.

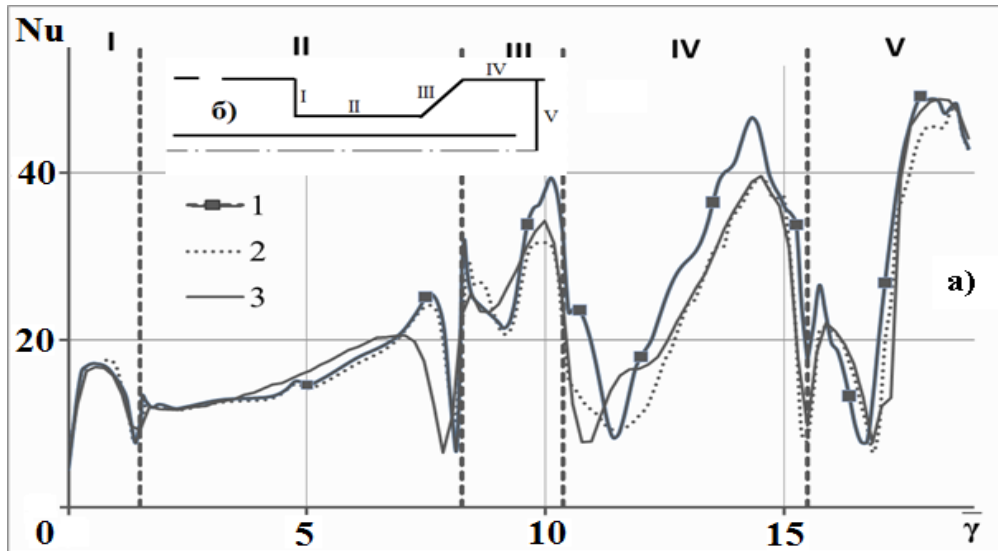
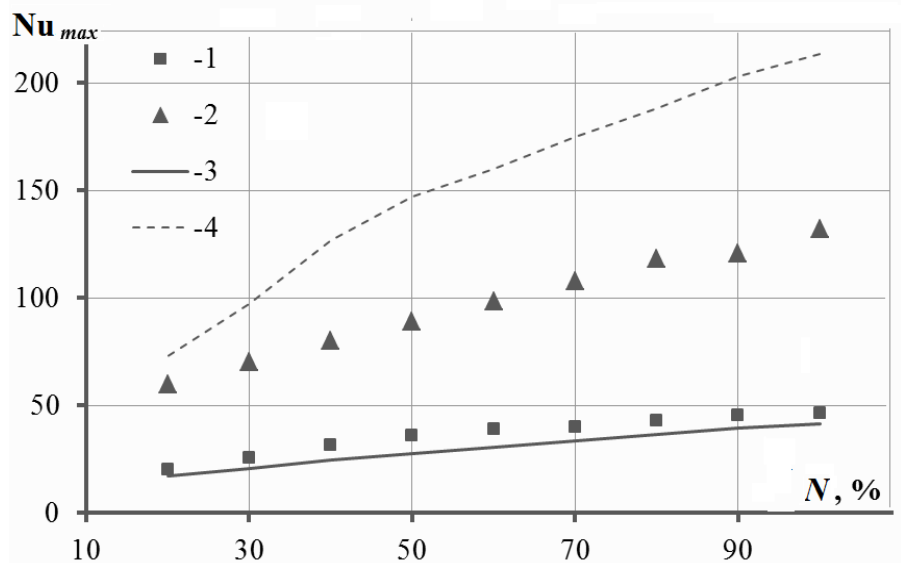


Рис. 22. Значення числа Нусельта на внутрішній поверхні модуля (а) і розташування на даній поверхні характерних зон I – V (б) для системи охолодження з дефлекторами різної конфігурації: 1, 2 – направляючий прямий і заокруглений дефлектори, 3 – спеціально спрофільований дефлектор із заокругленим торцем.

Рис. 23. Залежність значення числа Nu_{max} від навантаження котла N для системи охолодження з обдувом торця модуля плоским (1), (3) і круглими струменями (2), (4), при різній ширині модулів \bar{B} : 1, 2 – $\bar{B} = 7,5$; 3, 4 – 12,5.



Згідно з наведеними даними зростання величини Nu_{max} з підвищенням навантаження N для системи охолодження з круглими струменями є більш суттєвим, ніж для систем охолодження з плоским імпульсним струменем. Тобто ефективність систем охолодження з круглими струменями виявляється чутливішою до зміни навантаження котлоагрегату.

На рис. 24 наведено дані, що ілюструють вплив навантаження котлоагрегату на рівень температур зовнішньої поверхні стінки модуля. Одержані результати свідчать про суттєве зростання даних температур зі зменшенням навантаження N . Так, для ситуацій, що розглядаються, при зниженні навантаження від номінального

до 20 % максимальна температура стінок модуля, що спостерігається на його затупленій зривній кромці, зростає приблизно в 1,4 рази.

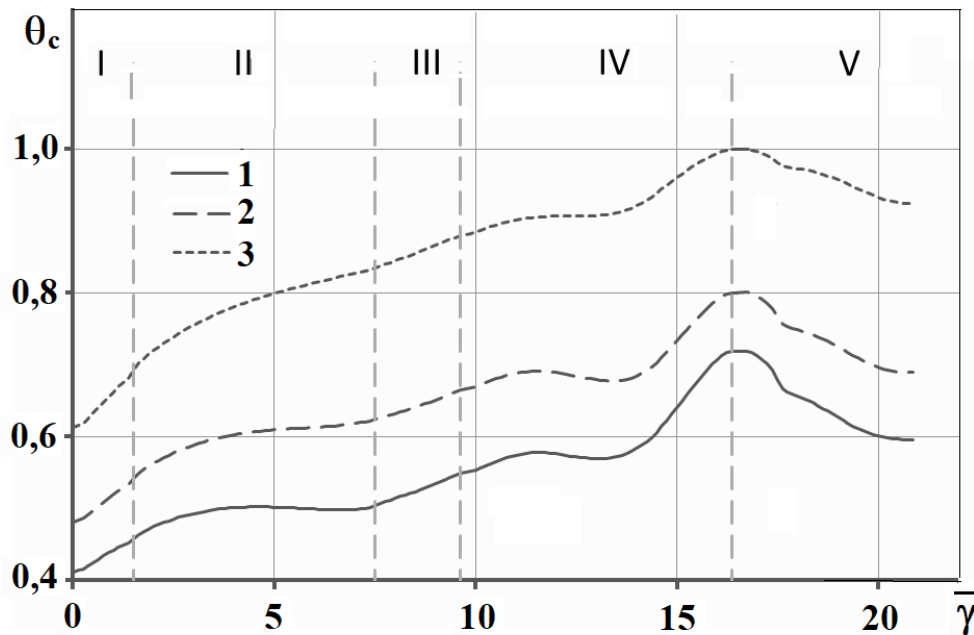


Рис. 24. Розподіл температури θ_c стінки модуля вздовж його зовнішньої поверхні для системи охолодження з обдувом торця модуля плоским імпульсним струменем при $\bar{V} = 7,5$ для різних значень навантажень котлоагрегату N : 1 – $N = 100\%$; 2 – 60% ; 3 – 20% .

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

Технічні рішення та ефективні конструкції цих палинків розроблено за результатами виконаних досліджень робочих процесів відповідних автономних палинкових модулів та системи модулів. Вказані результати було покладено, зокрема, в основу пропонованих рекомендацій з вибору геометричних і режимних параметрів паливободачі для досліджуваних палинкових пристроїв. Згідно з даними рекомендаціями для різних умов застосування палинків встановлено раціональні значення діаметрів d газоподавальних отворів, відносних кроків \bar{S} їх розташування, розмірів нішової порожнини $L \times H$, діапазонів зміни гідродинамічного параметра \bar{q} та коефіцієнта надлишку повітря α .

На рисунку 25 для прикладу наведено фото створеного палинкового пристрою у складі котла ДКВР-10/13. Характерні результати лабораторних досліджень для розроблених палинків ілюструють рис. 26 і 27.

Особлива увага в роботі приділялась дослідженням гідравлічних характеристик пропонованих палинків. Зокрема, показано, що розпал палинкового пристрою на основі струменево-нішових систем здійснюється при тисках газу, що дорівнюють 1-3 мм вод. ст. і витратам газу, які не перевищують 3% від його номінальної витрати. Для традиційно застосовуваних палинків ГА-100 і ГМТ-5 ці

тиски дорівнюють 60 і 150...160 мм вод. ст. відповідно. При цьому витрата газу становить близько 20 % від номінальної витрати.



Рис. 25. Блочний палинковий пристрій на основі струменево-нішових систем потужністю 8 МВт у складі котла ДКВР-10/13.

Рис. 26. Розподіл температури у поперечних перерізах факела модуля палинкового пристрою потужністю 2 МВт при різних значеннях діаметра газоподавальних отворів: 1, 2, 3 – $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; 4, 5, 6 – $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м; 1, 4 – $x = 0,32$ м; 2, 5 – $x = 0,63$ м; 3, 6 – $x = 0,94$ м; для $W_{\Pi} = 5,0$ м/с; $\alpha_{\Sigma} = 1,3$; $L_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м.

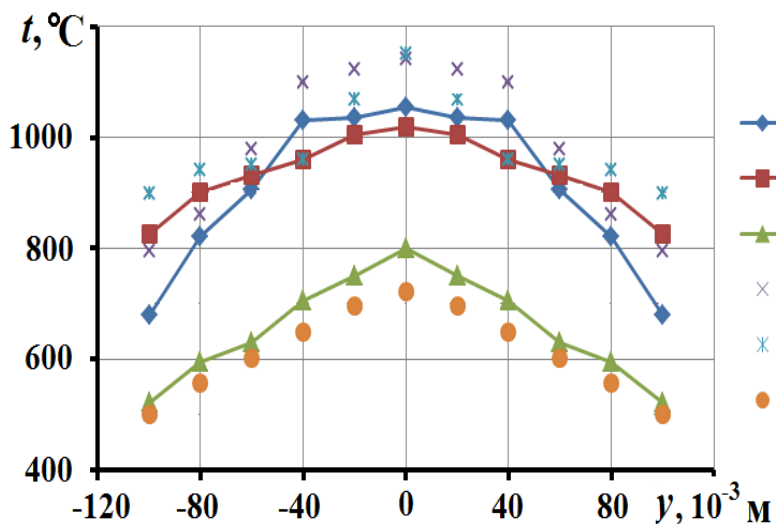
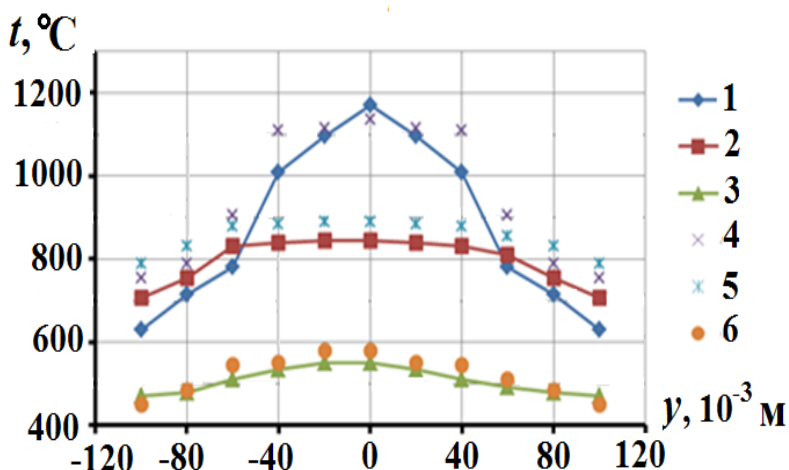


Рис. 27. Розподіл температури у поперечних перерізах факела модуля палинкового пристрою потужністю 2 МВт при різних значеннях відносного кроку розташування газоподавальних отворів: 1, 2, 3 – $\bar{S} = 2,3$; 4, 5, 6 – $\bar{S} = 4,6$; 1, 4 – $x = 0,32$ м; 2, 5 – $x = 0,63$ м; 3, 6 – $x = 0,94$ м; для $W_{\Pi} = 5,0$ м/с; $\alpha_{\Sigma} = 1,1$; $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 11 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м.

За результатами виконаних досліджень показано, що тиск газу перед пальником на основі струменево-нішової системи виявляється нижчим, ніж перед пальником ГА-110 більш ніж вдвічі, а перед пальником ГМГ-5 більш ніж у три рази в усьому діапазоні зміни навантаження котлоагрегату (рис. 28).

В роботі виконано комплекс досліджень із визначення ефективності заміни традиційно застосовуваних пальників пальниковими пристроями струменево-нішового типу. Згідно з результатами проведених досліджень вказана заміна забезпечує збільшення ККД котлів в середньому на 3-5 %. Крім того встановлено, що це збільшення суттєво залежить від навантаження котлоагрегату і виявляється найменшим у номінальному режимі його роботи та підвищується при відхиленні від даного режиму.

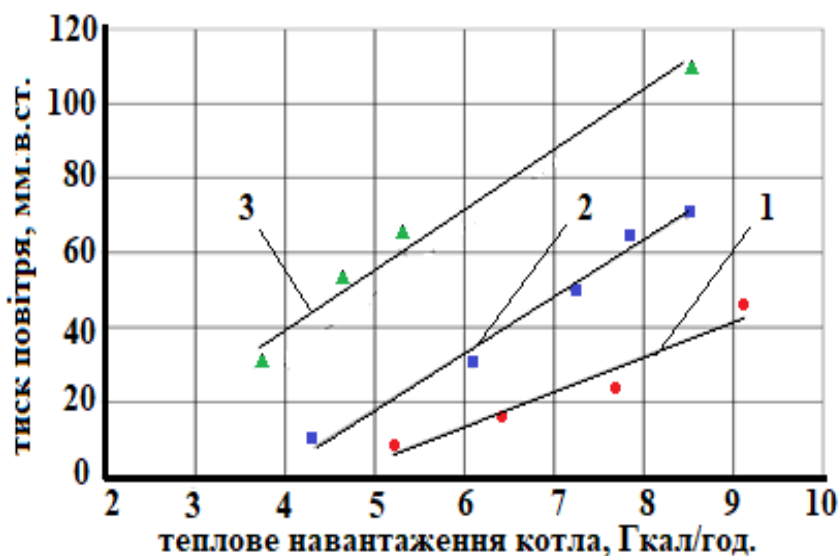


Рис. 28. Залежність тиску повітря перед пальниковими пристроями потужністю 8 МВт у складі котла ДКВР-10/13 від його навантаження: 1 – пальник на основі струменево-нішових систем; 2 – пальник ГА-110; 3 – пальник ГМГ-5.

Вцілому виконані дослідження характеристик пропонованих пальникових пристроїв показали, що при їх застосуванні реалізується: висока ступінь рівномірності поля температур у топковому просторі, широкі діапазони стійкості горіння та коефіцієнта робочого регулювання потужності вогнетехнічних об'єктів, низькі значення втрат тиску за трактами палива та окиснювача та підвищена довговічність пальникових пристроїв завдяки застосуванню спеціальних систем їх охолодження.

Результати роботи впроваджено більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктів в Україні, Білорусі, Росії, Польщі та Казахстані. Сертифіковано понад 100 типів і моделей розроблених пальникових пристроїв в ДП «Сертифікаційний випробувальний центр». Отримано право встановлення розроблених пальникових пристроїв на котлах Монастирищенського, Бійського, Дрогобузького та інших котельних заводів.

Рішенням науково-технічної ради № 16 від 26.10.2010 р. Міністерства житлово-комунального господарства України рекомендовано широке впровадження енергоощадної струменево-нішової технології спалювання палива.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено загальні положення теплофізики робочих процесів палинкових пристроїв із застосуванням струменево-нішових систем і на цій основі виконано науково-технічне обґрунтування ряду нових технологій спалювання газоподібного палива підвищеної енергетичної ефективності.

2. Виконано комплекс експериментальних досліджень робочого процесу автономних палинкових модулів різних типів – струменевих і струменево-нішових з нішовими порожнинами різноманітної конфігурації. При цьому:

а) для струменевих модулів – модуля з уступом і модуля з торцевою порожниною, встановлено закономірності течії, сумішоутворення палива і окиснювача та формування теплового стану стінок модуля. Зокрема, для модуля з торцевою порожниною отримано дані щодо характеристик сумішоутворення в закормовій області в залежності від гідродинамічного параметра \bar{q} , згідно з якими у широкому діапазоні зміни \bar{q} ($2,0 < \bar{q} < 12,0$) має місце практично постійний склад паливної суміші, що знаходиться у концентраційних межах займання; надано інтерпретацію факту перезбагачення паливної суміші при $0,2 < \bar{q} < 2,0$ на основі ефекту Коанда;

б) для струменево-нішових модулів з прямокутною приструменевою нішою – зручнообтічного модуля і модуля з торцевою порожниною, отримано дані щодо структури течії, особливостей сумішоутворення, стабілізації полум'я і вигорання палива. При цьому для струменево-нішового модуля з торцевою порожниною встановлено факт суттєвого розширення діапазону стійкого горіння у бік бідного зриву у порівнянні зі струменевим модулем завдяки стабілізуючим властивостям приструменевої нішової порожнини. Так, для ніші $(40 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м при $W_{\Pi} = 20,0$ м/с значення коефіцієнта надлишку повітря бідного зриву збільшується з 70 до 110. Показано також, що інтенсивність вигорання палива у струменево-нішових модулях є суттєво вищою, ніж у відповідній струменево-нішовій системі на гладкій поверхні; при цьому у досліджуваному діапазоні зміни визначальних параметрів у струменево-нішовому модулі довжина факелу скорочується у 1,5...2,0 рази;

в) для струменево-нішових модулів з трапецієвидною нішою за наявності і відсутності структураторів потоку виконано аналіз впливу геометричних параметрів нішової порожнини і структураторів потоку на характеристики течії та сумішоутворення палива і окиснювача. За результатами візуалізації обтікання нішових порожнин повітряним потоком за допомогою сажо-гасової суміші встановлено, що у порожнині трапецієвидної форми у порівнянні з прямокутною нішою спостерігається погіршення умов вихроутворення, так що при кутах нахилу бічних стінок ніші більше 60° основний нішовий вихор практично зникає. При встановленні на передній кромці ніші структуратора потоку безпосередньо під ним формується вихор, розміри якого є достатніми для надійної стабілізації полум'я. У широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса Re_r ($2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$) виконано порівняльний аналіз гідравлічних втрат при обтіканні ніш різної конфігурації збоку газового тракту; показано, що для

трапецієвидних ніш з кутом нахилу бічних поверхонь 45° вказані втрати зменшуються на 20% у порівнянні з відповідними втратами для прямокутної ніші. На основі зіставлення закономірностей сумішоутворення у трапецієвидних нішах зі структуратором потоку і нішах прямокутної форми показано, що для трапецієвидних ніш діапазон зміни відносних кроків \bar{S} розташування газоподавальних отворів, за якого забезпечуються концентраційні межі займання, зміщується в область більш низьких значень \bar{S} у порівнянні з прямокутною нішою.

3. Отримано експериментальні залежності відносних гідравлічних втрат у каналі з прямокутною нішою від гідродинамічного параметра \bar{q} і сумарного коефіцієнта надлишку повітря α_2 у широкому діапазоні зміни швидкості повітря (4,0...18,8 м/с) і показано, що дані втрати є порівняно невеликими.

4. Виконано комплексні дослідження характеристик займання та зриву горіння у струменево-нішових паливкових модулях різної конфігурації. В тому числі:

- запропоновано експериментально-розрахунковий підхід до визначення характеристик бідного зриву полум'я у струменево-нішовій системі з прямокутною нішою, який базується на використанні рівняння теплового балансу для цієї системи і даних щодо масообміну в нішовій порожнині;

- отримано дані досліджень меж стійкості і займання для струменево-нішового модуля з прямокутною нішою у широкому діапазоні зміни її геометричних параметрів при спалюванні природного газу і пропан-бутану; встановлено, що для досліджуваних паливних газів відношення витрат палива на режимах запалювання та бідного зриву є тим більшим, чим менша швидкість повітря. Дане відношення зростає зі зменшенням розмірів нішової порожнини і є дещо більшим для пропан-бутану у порівнянні з природним газом;

- показано, що конфігурація нішової порожнини суттєво впливає на межі займання і бідного зриву. Для прямокутної ніші ці межі є більш широкими, ніж для трапецієвидної нішової порожнини; умови запалювання і бідного зриву для трапецієвидної ніші помітно погіршуються зі збільшенням кута нахилу бічних стінок ніші, так що при куті 60° загоряння реалізується лише при досить високих швидкостях повітря ($W_{\text{п}} \geq 15,0$ м/с); при цьому збільшення об'єму ніші призводить до погіршення її стабілізаційних властивостей;

- встановлено, що застосування структураторів потоку забезпечує надійну стабілізацію полум'я у нішах трапецієвидної форми у широкому діапазоні зміни швидкості повітря. Визначено геометричні параметри структураторів, за яких забезпечуються необхідні межі сталості горіння;

- на основі статистичних методів планування експерименту виконано аналіз впливу геометричних параметрів паливорозподілу на характеристики бідного зриву для струменево-нішового модуля з прямокутною нішою і визначено області рекомендованих значень цих параметрів за умов спалювання природного газу і пропан-бутану.

5. Отримано результати експериментальних досліджень робочих процесів систем, що складаються з декількох струменево-нішових модулів:

- 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;

- за даними досліджень, проведених у широкому практично важливому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку повітря ($\alpha = 1 \dots 100$) і його швидкості ($W_{\text{п}} = 16,0 \dots 25,0$ м/с), для систем, що складаються з двох модулів з прямокутною нішою, встановлено, що форма і геометричні характеристики факела полум'я є практично однаковими за обома модулями і визначаються коефіцієнтом надлишку повітря при незначній залежності від величини $W_{\text{п}}$. Зроблено 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;

- для системи зручнообтічних модулів виконано дослідження характеристик горіння палива у широкому діапазоні зміни коефіцієнта загромождження k_f прохідного перерізу каналу.

6. На основі CFD моделювання для пальникових пристроїв із застосуванням струменево-нішових модулів виконано цикл досліджень теплообміну та аеродинаміки у спеціальних системах їх охолодження, проведено аналіз теплового стану даних пристроїв і виконано загальну оцінку ефективності вказаних систем:

- встановлено закономірності течії та теплообміну у системах охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора полум'я круглими імпактними струменями або плоским імпактним струменем за умови використання дефлекторних конструкцій різної конфігурації;

- досліджено особливості зміни характеристик систем охолодження при варіюванні навантаження котлоагрегату.

7. За результатами виконаних досліджень розроблено технічні рішення і 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».

8. Проведено дослідження розроблених пальникових пристроїв у складі різних вогнетехнічних об'єктів. Показано, що при застосуванні даних пальників забезпечуються: широкі діапазони стійкості горіння як за величиною надлишку повітря, так і за швидкістю окиснювача; високі значення коефіцієнта робочого регулювання потужності вогнетехнічного об'єкту; гранично низькі величини втрат тиску за трактами палива та окиснювача, а відтак і низькі значення тиску паливного газу на пускових режимах (10-30 Па); висока ступінь рівномірності поля температур у топковому просторі; підвищений ресурс пальників та термічна підготовка палива завдяки застосуванню спеціальних систем їхнього охолодження; незначна залежність ККД вогнетехнічного об'єкту від рівня його навантаження.

9. Результати роботи впроваджено більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктах в Україні, Білорусі, Росії, Польщі та Казахстані. Отримано право встановлення

розроблених пальникових пристроїв на котлах Монастирищенського, Бійського, Дрогобужського та інших котельних заводів.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

B – ширина модуля; $\bar{B} = B/d$; d – діаметр газоподавальних отворів; H – глибина ніші; H_K – висота каналу; k_f – коефіцієнт загромодження прохідного перерізу каналу; L – довжина ніші; L_1 – відстань від зривної кромки модуля до газоподавальних отворів; L_3 – довжина закрилка; N – відносне навантаження котлоагрегату, $N = N_p/N_{\text{ном}} \cdot 100\%$; N_p , $N_{\text{ном}}$ – реальне і номінальне значення теплової потужності котлоагрегату; \bar{q} – гідродинамічний параметр; S – крок розташування газоподавальних отворів, $\bar{S} = S/d$; t – температура; T – абсолютна температура; t_c , $t_{\text{доп}}$ – температура зовнішньої поверхні стінки модуля та її допустиме значення; $W_{\text{п}}$ – швидкість повітря на вході в канал; $W_{\text{г}}$ – середня швидкість газу в газоподавальних отворах; W , W' – швидкість і пульсації швидкості; x , y , z – координати; α , α_{Σ} – локальне і сумарне значення коефіцієнта надлишку повітря; α_T – коефіцієнт тепловіддачі; γ – координата, що відраховується від передньої кромки ніші вздовж внутрішньої поверхні модуля; $\bar{\gamma} = \gamma/d$; ζ – відносні гідравлічні втрати в каналі зі струменево-нішовою системою; η_z – повнота згоряння палива; $\theta_c = t_c/t_{\text{доп}}$; ζ – відносні гідравлічні втрати в каналі зі струменево-нішовою системою, $\zeta = 2\Delta P/\rho_{\text{п}} W_{\text{п}}^2$, де ΔP – втрати тиску в каналі, $\rho_{\text{п}}$ – густина повітря на вході в канал; ξ , ξ_0 – коефіцієнт гідравлічних втрат при внутрішньому обтіканні трапецієвидної і прямокутної ніші, $\xi = 2\Delta P_{\text{г}}/\rho_{\text{г}} W_{\text{г}}^2$, де $\Delta P_{\text{г}}$ – втрати тиску по тракту паливного газу, $\rho_{\text{г}}$ – густина газу на вході; $Nu = \frac{\alpha_T \cdot d}{\lambda_T}$, де λ_T – коефіцієнт теплопровідності газу на вході; $Re_{\text{г}} = \frac{2W_{\text{г}} \cdot h}{\nu_{\text{г}}}$, де h – відстань між нижньою площиною ніші і газоподавальним каналом; $\nu_{\text{г}}$ – кінематична в'язкість паливного газу на вході.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулін М.З. Системи охолодження мікрофакельних горелочних пристроїв з плоскими стабилизаторами пламени. Київ: «Софія-А». 2016. 200 с. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, проведенні експериментальних досліджень та аналізі їх результатів.*
2. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимошенко А.Б. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. Восточно-европейский

- журнал передовых технологий. 2014. Т.3. №8/69. С.40-44. (н.б. *Scopus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*
3. Abdulin M., Siryi O., Zhuchenko A., Abdulin A. Improvement of reliability of fire engineering equipment based on a jet-niche technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V2. № 8(92). С.12-19. (н.б. *Scopus*). *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів, аналіз одержаних результатів.*
 4. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. № 24.5. С. 136-142. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*
 5. Фіалко Н.М., Майсон М.В., Абдулін М.З., Ганжа М.В., Рокитько К.В., Озеров А.А., Хміль Д.П. Закономірності течії в прямокутних кільцевих нішах циліндричних стабілізаторних пальників різної потужності. *Науковий вісник НУБіП України*. 2016. № 240. С. 69-76. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*
 6. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Прокопов В.Г., Полозенко Н.П., Меранова Н.О., Алешко С.А., Милко Е.И., Озеров А.А., Кутняк О.Н., Швецова Л.А., Абдулін М.З. Влияние на характеристики течения степени загромождения эшелонированными стабилизаторами каналов горелочных устройств. *Науковий вісник НУБіП України*. 2015. №209.Ч2. С.45-53.(н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*
 7. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б. Влияние пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения и смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. № 24.6. С.114-121. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*
 8. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Тимощенко О.Б., Юрчук В.Л., Іваненко Г.В., Клищ А.В. Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т. 27. №3. С.131-135. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, проведенні експериментів, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*
 9. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимощенко О.Б., Сірій О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А., Клищ А.В., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я. Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. *Науковий вісник НЛТУ України* 2018. Т.28. №3. С.97-100. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, проведенні експериментів, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*

10. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Клищ А.В., Новицький В.С., Евтушенко А.А. Закономерности смесеобразования в эшелонированных решетках плоских стабилизаторов пламени. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. №24.7. С.187-191. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, та аналізі результатів досліджень.*
11. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Майсон М.В., Шеренковський Ю.В., Іваненко Г.В., Абдулін М.З., Ольховська Н.М., Швецова Л.А., Дончак М.І., Бутовський Л.С. Особливості течії та сумішоутворення в мікрофакельних циліндричних пальникових пристроях різної потужності. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2014. №194/3. С.94-101. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, та аналізі результатів досліджень.*
12. Фіалко Н.М., Майсон М.В., Тимощенко О. Б., Меранова Н.О., Іваненко Г.В., Юрчук В.Л., Ганжа М.В., Дончак М.І., Абдулін М.З. Особливості аеродинаміки пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2016. №252. С.52-61. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, та аналізі результатів досліджень.*
13. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Іваненко Г.В., Абдулін М.З., Кутняк О.М., Озеров А.А., Бутовський Л.С. Структура течії в мікрофакельних пальниках з ешелонованими решітками стабілізаторів полум'я. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2014. №194/3. С.107-113. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, та аналізі результатів досліджень.*
14. Абдулін М.З., Сірий О.А. Принципи організації робочого процесу камер згоряння. Авіаційно-космічна техніка та технологія. 2014. № 8/115. С.73-78. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів досліджень.*
15. Абдулін М.З., Баранюк О.В., Сірий О.А. Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменево-нішовій системі спалювання палива. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 9/1181. С. 94-100. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень та участь в аналізі одержаних даних.*
16. Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження енергетичних показників струменево-нішової системи спалювання палива. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 12/1288. С.89-94. (н.б. *Index Copernicus*). *Внесок здобувача: постановка завдань, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів.*
17. Абдулін М.З., Сірий О.А. Ізотермічні дослідження модулів ПП на основі струменево-нішових систем. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2013. № 13/987. С.81-88. (н.б. *Ulrich's Periodical Directory*). *Внесок здобувача: участь в постановці завдань, проведенні досліджень та аналізі отриманих даних.*

18. Абдулін М.З., Джамал І. Критичні режими та конструктивні параметри мікродифузійного пальникового пристрою. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1997. №2. С.70-71. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів досліджень.*
19. Абдулин М.З. Технологии сжигания топлива – основы создания эффективных камер сгорания. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. №4/61. С. 40-42.
20. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Малецкая О.Е., Ночовный А.В. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. *Промышленная теплотехника*. 2012. №1. С.72-76. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь аналізі їх результатів.*
21. Абдулін М.З., Джамал І. Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1997. №2. С.68-69. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментальних досліджень та аналізі їх результатів.*
22. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование», *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2005. №6. С.130-144.
23. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Полозенко Н.П., Мартюк О.В. Исследование эффективности систем охлаждения микрофакельных горелочных устройств. *Промышленная теплотехника*. 2013. №1. С.36-41. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*
24. Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження сталості горіння в струменево-нішовій системі при обмеженні дальнобійності паливних струменів. *К: Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 3/37. С.22-29. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів.*
25. Фиалко Н.М., Абдулин М.З., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В. Характеристики циркуляционных течений в ближнем следе цилиндрических стабилизаторов пламени. *Промышленная теплотехника*. 2015. №3. С.47-53. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань досліджень, проведенні експериментів та аналізі результатів.*
26. Фиалко Н.М., Майсон Н.В., Шеренковский Ю.В., Ганжа М.В. Абдулин М.З., Варич А.В., Войтенко А.Ю. Сравнительный анализ закономерностей течения и смесеобразования при использовании в качестве стабилизаторов пламени плоских и цилиндрических тел. *Промышленная теплотехника*. 2015. №7. С.181-186. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*
27. Томаш М.А., Изотов Б.В., Турбаба А.Е., Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Гребинная М.В. Модернизация горелочного оборудования зажигательных горнов агломерационных машин. *Журнал «Металл и литье Украины»*. 2017. №1. С.16-19. *Внесок здобувача: участь у розробленні рекомендацій щодо застосування*

пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем в агломераційних печах.

28. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Коханенко П.С., Полозенко Н.П. Математическое моделирование динамики течения и смесеобразования при сжигании топлива в горелочных устройствах струйно-нишевого типа. Промышленная теплотехника. 2009. №7. С.24. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів.*
29. Абдулин М.З., Жученко А.М., Дворцин Г.Р., Кулешов Ю.А., Абдулин А.М. Модернизация огнетехнического оборудования. Энергоназор. 2014. №4. С.27-29. *Внесок здобувача: аналіз сучасних технологій спалювання газу.*
30. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М. Технология сжигания – определяющий фактор эффективности огнетехнических объектов. Новости теплоснабжения. 2009. №11. 8 с. *Внесок здобувача: аналіз результатів досліджень енергетичної ефективності пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем.*
31. Abdulin M.Z., Siryi O.A. Research of hydro dynamic flame stabilizer with cross fuel feed characteristics. Scientific Journal of Riga Technical University. Series: Power and Electrical Engineering. 2014. №32. P.12-18. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі одержаних даних.*
32. Абдулин М.З., Овсиенко И.П., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Кулешов Ю.А. Оптимизация топочного процесса - путь к повышению эффективности, экологической безопасности и надежности работы котлов. Новости теплоснабжения. 2008. №4. С. 31-34. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень та аналіз результатів.*
33. Абдулин М.З. Энергоэффективная струйная нишевая технология сжигания газа на объектах малой и средней энергетики. Праці ІЕД НАНУ. 2006. С.83-87.
34. Polupan G., Abdulin M., Real Ramirez C. A., Tolentino Eslava G., Lopez Ramirez S., Desarrollo e Investigacion Computacional de Quemadores Rectangulares con Combustion Tipo Microdifusa. 8 Congreso Nacional de Ingenieria Electromecanica y de Sistemas. Mexico. 2004. С. 312-317. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань досліджень та аналізі результатів.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

35. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Майсон Н.В., Шеренковский Ю.В., Иваненко Г.В., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Ольховская Н.Н., Швецова Л.А., Дончак М.И. Закономерности течения и смесеобразования топлива и окислителя в микрофакельных цилиндрических горелочных устройствах различной мощности. Тези ІІ міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК». (15 – 16 жовтня 2014). Київ. С.117-118
36. Абдулин М.З. Фиалко Н.М. Меранова Н.О. Дворцин Г.Р. Жученко А.М. Научно-технический опыт апробации струйно-нишевой технологии сжигания топлива на объектах промышленной и коммунальной энергетики. Материалы V

Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». (22-26 мая 2007). Киев. 2007. С. 108.

37. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.М., Полозенко Н.П., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Мельник П.М. Характеристики течения в лестнично эшелонированной решетке стабилизаторов пламени. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С.93-97.
38. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Стрижеус С.М., Єніна А.О., Тимошенко О.Б. Математичне моделювання процесів сумішоутворення в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 114-117.
39. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Озеров А.А. Комп'ютерне моделювання течії та теплообміну в системах охолодження мікрофакельних пальникових пристроїв. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 117-122.
40. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Хомук С.В., Єніна А.О., Новицький В.С., Тимошенко О.Б. Підвищення інтенсивності процесів переносу в циліндричному стабілізаторному пальнику шляхом застосування прямокутних кільцевих ніш. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 122-125.
41. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.М., Полозенко Н.П., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Мельник П.М. Влияние количества стабилизаторов пламени на особенности течения в эшелонированных стабилизаторных решетках. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 125-128.
42. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Иваненко Г.В., Варич А.В., Мартюк О.В. Влияние шага смещения стабилизаторов пламени на характеристики смесеобразования топлива и окислителя. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2015. С. 107-109.
43. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З. Закономерности формирования температурных полей продуктов горения. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2015. С. 110-113.
44. Фиалко Н.М., Абдулин М.З., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Серый А.А., Рокитько К.В. Особенности течения и температурных режимов циркуляционных

- зон в ближнем следе цилиндрических стабилизаторов пламени. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2015. С. 113-120.
45. Фиалко Н.М., Майсон М.В., Меранова Н.О., Иваненко Г.В., Юрчук В.Л., Абдулин М.З., Ганжа М.В., Дончак М.И. Закономерности течения в цилиндрических горелочных устройствах с турбулизаторами потока на их затупленных задних кромках. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2016. С. 117-120.
46. Абдулин М.З., Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Тимощенко А.Б., Юрчук В.Л., Иваненко Г.В., Клищ А.В. Характеристики течения в горелочном устройстве с угловыми турбулизаторами потока. Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2017. С. 99-101.
47. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимощенко О.Б., Сірій О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А., Кліщ А.В., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я. Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2018. С.79-82.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

Патенти:

48. Патент на винахід №51844, Україна. Спосіб спалювання природного газу у потоці повітря, що набігає. Дворцин Г.Р., Абдулін М.З. // опубл. 16.12.2002.
49. Патент на винахід № 54616, Україна. Пристрій для спалювання газу. Дворцин Г.Р., Абдулін М.З. // опубл. 17.03.2003.
50. Патент на винахід № 005471, Евразия. Способ сжигания природного газа в набегающем потоке воздуха. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р // опубл. 24.02.2005.
51. Патент на корисну модель № 35108, Україна. Пристрій для спалювання газу. Жученко А.М., Дворцин Г.Р., Абдулін М.З. // опубл. 26.08.2008.
52. Патент на корисну модель № 49938, Україна. Пальниковий пристрій. Абдулін М.З., Долінський А.А., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Кулешов Ю.О., Мілко Є.І., Фіалко Н.М. // опубл. 07.04.2010.
53. Патент на корисну модель № 83358, Україна. Газовий пальник. Фіалко Н.М., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Дворцин Г.Р., Грановська О.О., Меранова Н.О. // опубл. 10.09.2013.
54. Патент на корисну модель №82967, Україна. Пальник газовий. Фіалко Н.М., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Дворцин Г.Р. // опубл. 27.08.2013.

Основні результати у публікаціях відображені повно.

АНОТАЦІЯ

Абдулін М.З. Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив із застосуванням струменево-нішових систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробленню основних положень теплофізики прогресивних технологій спалювання газоподібних палив у пальниках зі струменево-нішовими системами. Виконано цикл експериментальних досліджень теплофізичних аспектів робочого процесу автономних пальникових модулів різних типів – струменевих і струменево-нішових з нішовими порожнинами різноманітної конфігурації (прямокутною, трапецієвидною тощо). Особливу увагу приділено комплексним дослідженням характеристик займання та зриву горіння у струменево-нішових пальникових модулях. Наведено дані аналізу робочих процесів систем, що складаються з декількох струменево-нішових модулів та на їх основі обґрунтовано принцип модульного конструювання пальникових пристроїв. На основі CFD моделювання виконано дослідження закономірностей течії і теплообміну в пропонованих системах охолодження пальників струменево-нішового типу. За результатами виконаних досліджень розроблено технічні рішення і ефективні конструкції на основі струменево-нішових систем. Проведено комплекс випробувань розроблених пальників у складі вогнетехнічних об'єктів різного призначення – котли, печі, сушарки тощо. Результати роботи широко впроваджено на енергетичних об'єктах України, Білорусі, Росії, Польщі, Казахстану.

Ключові слова: пальникові струменево-нішові модулі, нішові порожнини різної конфігурації, процеси спалювання палива, характеристики займання та зриву горіння, аеродинаміка і теплообмін.

SUMMARY

Abdulin M.Z. Development of thermophysical fundamentals of fuel combustion technologies using jet-niche systems. – The manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.14.06 - Engineering Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering. - Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of the basic principles of thermophysics of advanced technologies for burning gaseous fuels in burners with a jet-niche system. A series of experimental studies of the thermophysical aspects of the working processes of autonomous burner modules of various types – jet and jet-niche with niche cavities of various configurations (rectangular, trapezoidal, etc.) has been completed. Particular attention is paid to comprehensive studies of the characteristics of ignition and failure of combustion in jet-niche burner modules. The data of the analysis of the working processes of systems consisting of several jet-niche modules are presented

and on their basis the principle of modular design of burner devices is justified. The studies of the patterns of flow and heat transfer in the proposed cooling systems for jet-niche burners are made based on CFD modeling. Using the results of the research, technical solutions and effective designs based on jet-niche systems have been developed. A set of tests of the developed burners has been carried out as part of fire-technical objects for various purposes - boilers, furnaces, dryers and other. The results of the work have been widely implemented at energy facilities in Ukraine, Belarus, Russia, Poland, Kazakhstan.

Key words: burner jet-niche modules, niche cavities of various configurations, fuel combustion processes, characteristics of ignition and failure of combustion, aerodynamics and heat transfer.