

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

ТИМОЩЕНКО ОЛЕКСАНДРА БОРИСІВНА



УДК 536.24:533

**РОЗРОБЛЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ЗАСАД СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ В
МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ МАЛОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, місто Київ

Науковий керівник :

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.

Захист відбудеться « 9 » грудня 2020 р. о 13 годині 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: 6 листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Пальникові пристрої відносно малої потужності широко застосовуються в енергетичному обладнанні різного призначення. Їх використання виявляється достатньо ефективним для вогнетехнічних об'єктів не лише порівняно невеликої, але й різної теплової продуктивності за умов, коли висуваються високі вимоги до рівномірності підводу теплоти по вогневому простору. Для зазначених ситуацій доцільним є використання мікрофакельних пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я. Їхня більш висока ефективність у порівнянні з традиційними аналогами, в яких застосовуються плоскі стабілізатори полум'я, зумовлена, головним чином, більшою інтенсивністю перебігу їхніх робочих процесів. Практично важливим є також те, що мікрофакельні пальники з циліндричними стабілізаторами полум'я завдяки особливостям їх конфігурації достатньо прості у виготовленні. Вони відносно легко інтегруються у конструкцію енергетичного обладнання, характеризуються низькою металоємністю, легкістю проведення ремонтних робіт тощо.

Потреби розвитку технологій спалювання палива із застосуванням пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я зумовлюють необхідність їх поглиблених теплофізичних досліджень. Широке застосування цих технологій стримується значною мірою через практичну відсутність таких досліджень. Вказане зумовлює актуальність цієї роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Основні результати роботи отримано в рамках виконання двох бюджетних тем: «Розробка теплофізичних основ технології комбінованого дифузійного і кінетичного спалювання природного газу в топках котлів» (№ ДР: 0109U002854); «Теплофізичне обґрунтування прогресивних технологій мікрофакельного спалювання палива та утилізації теплоти відхідних газів котлоагрегатів і теплових установок технологічного призначення» (№ ДР: 0112U002278); спільного проекту фундаментальних досліджень фондів фундаментальних досліджень України та Білорусі «Інтенсифікація процесів горіння в пальникових пристроях стабілізаторного типу і топках киплячого шару» (№ ДР: 0114U004368) та двох господарських договорів: «Математичне моделювання аеродинаміки і сумішоутворення в стабілізаторних пальникових пристроях і розробка рекомендацій щодо створення їх натурних зразків і впровадження» та «Математичне моделювання процесів переносу в пальникових пристроях стабілізаторного типу при використанні різних способів інтенсифікації процесу горіння і розробка рекомендацій щодо їх впровадження» (№ ДР: 0111U008856с).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є теплофізичне обґрунтування технології спалювання газоподібного палива для типоряду пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю від 30 до 200 кВт при подачі палива зануренням у поперечний потік окиснювача і розробка на цій основі рекомендацій щодо застосування різних модифікацій таких пристроїв.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали такі завдання:

- виконати порівняльний аналіз основних особливостей перебігу робочих процесів у мікрофакельних пальниках з гладкими циліндричними і плоскими стабілізаторами полум'я;

- дослідити закономірності течії, сумішоутворення палива і окиснювача, вигорання палива та формування температурних полів у зоні горіння для різних модифікацій мікрофакельних пальників малої потужності: з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я і за наявності кільцевих нішових порожнин на їх бічних поверхнях та турбулізаторів потоку на затуплених задніх кромках;

- для пальникових пристроїв з гладкими стабілізаторами полум'я виявити закономірності займання і зриву горіння та виконати аналіз можливості регулювання процесами сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника;

- на основі досліджень процесів переносу в пальникових пристроях з кільцевими нішовими порожнинами на їхніх бічних поверхнях визначити раціональні конструктивні параметри даної модифікації пальників малої потужності;

- виконати зіставлення основних характеристик робочих процесів у пальниках малої потужності за наявності та відсутності турбулізаторів потоку, встановлених на зривних кромках стабілізаторів полум'я.

Об'єкт дослідження - робочі процеси в мікрофакельних пальникових пристроях малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я.

Предмет дослідження – характеристики процесів переносу в пальникових пристроях різних модифікацій з циліндричними стабілізаторами полум'я.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використовувалися методи математичного моделювання та експериментальні методи дослідження.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень базується на використанні сучасних методів фізичного і математичного моделювання та на задовільному узгодженні результатів виконаних експериментальних досліджень і даних комп'ютерного моделювання. Достовірність наукових положень і висновків, що захищаються, підтверджується також досвідом впровадження розроблених пальникових пристроїв.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше для мікрофакельних газових пальників малої потужності одержано дані порівняльного аналізу характеристик течії, сумішоутворення, теплопереносу та вигорання палива при застосуванні циліндричних і плоских стабілізаторів полум'я. Встановлено, що при застосуванні циліндричних стабілізаторів забезпечується підвищення рівня турбулізації потоку, швидкості процесу сумішоутворення, зменшення нерівномірності поля температур у поперечних перерізах факела, інтенсифікація процесу вигорання палива та зменшення втрат тиску у пальнику.

2. Вперше досліджено можливість регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю 30-200 кВт. Показано, що для забезпечення у вказаних пальниках так званого внутрішнього сумішоутворення (коли в усті пальника має місце практично повне перемішування палива і окиснювача) газоподавальні отвори необхідно розташовувати на відстані від зривної кромки стабілізатора, що дорівнює приблизно 35 діаметрам цих отворів.

3. Вперше для модифікації мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності кільцевих прямокутних нішових порожнин на їхніх бічних поверхнях виявлено ефекти впливу даних порожнин на робочі процеси в пальниках та обґрунтовано вибір їх просторових характеристик.

4. Вперше встановлено закономірності аеродинаміки, змішування палива і окиснювача, вигорання палива і формування температурних полів зони горіння для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з пластинчастими турбулізаторами потоку на зривних кромках циліндричних стабілізаторів полум'я.

Практичне значення отриманих результатів. Результати виконаних досліджень використано при розробленні різних модифікацій циліндричних пальникових пристроїв стабілізаторного типу. Дані пальникові пристрої застосовуються у вогнетехнічних об'єктах невеликої теплопродуктивності, а також за умов, коли необхідним є забезпечення високого ступеня рівномірності підведення теплоти у вогневому просторі.

Зазначені пальникові пристрої впроваджено в енергетичну практику в НВК «Струменево-нішова технологія» на сушарках фасонних елементів футерування енергетичного обладнання, котлах типу «НІСТУ», Е-1,0-0,9ГН-2 та ін.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, розробленні принципів схем пропонуваніх пальників та рекомендацій щодо умов їх впровадження. Автор брав участь у постановці завдань досліджень, проведенні обчислювальних і натурних експериментів та аналізі отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на таких конференціях: на VIII та X Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, жовтень 2013 р., травень 2017 р.); на XVI, XXI, XXII, XXVI, XXVII та XXVIII Міжнародних конференціях «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (м. Севастополь, червень 2006 р; м. Ялта, червень 2011 р., 2012 р., м. Київ, грудень 2014 р., 2017 р, 2018 р., 2019 р.); на XLV Міжнародній науково - практичній конференції «Актуальні проблеми сучасної науки» (Харків - Відень - Берлін –Астана, листопад 2019 р.); на міжнародних конференціях: 7th International scientific and practical conference «Scientific achievements of modern society» (Liverpool, March 2020); II International scientific and practical conference «Modern science: problems and innovations» (Stockholm, May 2020).

Публікації. Основні наукові положення, які повністю розкривають зміст і результати дисертації, викладено в 34 друкованих працях, зокрема, у 12 статтях, що входять до наукометричних баз даних, 4 статтях у наукових фахових виданнях України та 17 публікаціях у збірниках наукових праць за матеріалами конференцій. За результатами роботи одержано патент України.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та трьох додатків. Обсяг роботи становить 174 сторінки, включаючи 77 ілюстрацій та 9 таблиць. Перелік використаних літературних джерел містить 140 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету та основні завдання, відображено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації за результатами роботи.

У першому розділі наводиться огляд досліджень, що стосуються робочих процесів мікрофакельних газових пальників малої потужності. Серед таких пальників особливо виділяються пристрої, що базуються на застосуванні циліндричних елементів – різноманітні пальники на базі трубчастих модулів, модульні елементи камер згоряння АВВ тощо. Дослідженню тепломасопереносу в пальникових пристроях даного типу присвячено роботи В.О. Христича, Г.М. Любчика, Г.Б. Варламова, Г.С. Марченка, Г.О. Мікуліна та ін.

Щодо мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я, які мають низку достоїнств, то теплофізичні дослідження тут практично відсутні. Дана робота покликана заповнити цю прогалину.

Розглядаються різні способи інтенсифікації процесів спалювання палива у мікрофакельних пальниках стабілізаторного типу. Відмічається актуальність аналізу можливостей інтенсифікації горіння у пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я шляхом встановлення спеціальних турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках та застосування нішових порожнин на бічних поверхнях стабілізаторів.

Певна увага приділяється особливостям комп'ютерного моделювання досліджуваної фізичної ситуації та відмічається перспективність його застосування як ефективного інструмента дослідження процесів горіння.

На основі виконаного аналізу сформульовано основні завдання до сліджень.

Другий розділ присвячено висвітленню особливостей методики комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень.

Дослідженню підлягали процеси переносу в умовах спалювання палива у мікрофакельних пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я. При цьому розглядалися три модифікації таких пристроїв, що відрізнялися за особливостями конфігурації стабілізатора полум'я (рис. 1). Перша з вказаних модифікацій відповідала гладким стабілізаторам, друга – наявності кільцевих нішових порожнин на їхніх бічних поверхнях, третя – встановленню пластинчастих турбулізаторів потоку на зривних кромках стабілізаторів.

Математична постановка даної задачі тепломасопереносу має вигляд:

рівняння руху

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

рівняння неперервності

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

рівняння енергії для реагуючих турбулентних потоків

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

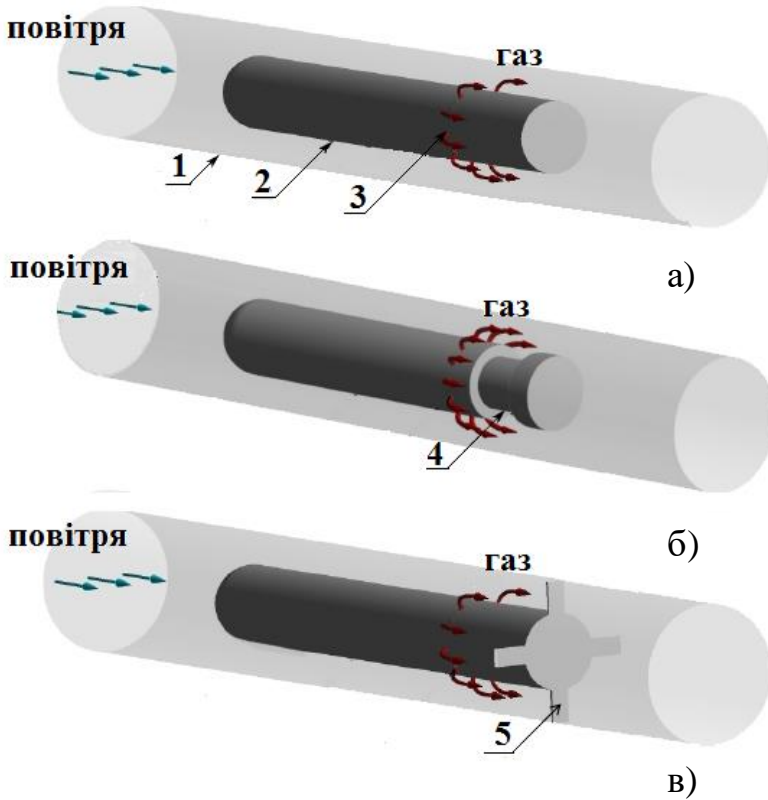


Рис. 1. Схеми паликових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я різної конфігурації: гладкими (а); з кільцевими нішовими порожнинами на бічних поверхнях стабілізаторів (б); з пластинчастими турбулізаторами потоку на зривних кромках стабілізаторів (в); 1 – циліндричний канал; 2 – циліндричний стабілізатор; 3 – газоподавальні отвори; 4 – кільцева ніша; 5 – пластинчасті турбулізатори потоку.

рівняння збереження маси i -го хімічного компонента

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

рівняння стану для багатоконпонентної суміші

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

де \vec{U} – вектор швидкості; τ – час; P – статичний тиск; S^* – тензор напружень, що враховує в'язкі напруження та додаткові напруження, які зумовлені турбулентністю; ρ – густина; \vec{q}_Σ – сумарний тепловий потік, що включає потік теплопровідністю та додатковий потік, який викликаний турбулентними пульсаціями; q_V – джерельний член, що враховує теплоту хімічних реакцій і перенос теплоти радіацією; I – загальна ентальпія, $I = \sum_i Y_i I_i$ (тут I_i , Y_i – ентальпія та масова концентрація i -го компонента);

R_i – джерельний член, що враховує швидкість утворення i -ого компонента в хімічній реакції; \vec{J}_i – потік маси i -го компонента, що зумовлений дифузиею і турбулентним переносом; M_i – молекулярна маса i -го компонента; N – кількість компонентів суміші; T – абсолютна температура; R – універсальна газова стала.

Граничні умови для наведеної вище системи рівнянь визначалися таким чином. У перерізах, що відповідають входу в канал паликового пристрою та в газоподавальні отвори, задавалися постійні значення швидкостей, концентрацій, температур тощо. У вихідному перерізі каналу паликового пристрою ставилися так

звані «м'які» граничні умови – рівність нулю позовжніх похідних усіх залежних змінних. На непроникних граничних поверхнях каналу і стабілізаторів задавалися умови «прилипання». На бічних поверхнях каналу приймалися граничні умови другого роду.

Для замикання системи рівнянь (1) – (5) у роботі виконано верифікацію моделей турбулентного переносу. З цією метою дані відповідних експериментальних досліджень зіставлялися з розв'язками задач, одержаними із застосуванням основних моделей, що фігурують у сучасному каталозі замикаючих моделей: $k-\varepsilon$ моделі в модифікаціях Standard, Realizable та RNG, моделі Спаларта-Аллмареса, SST – моделі Ментера ($k-\omega$ модель) та BSL – $k-\omega$ моделі.

У ході досліджень з вибору адекватної моделі турбулентного переносу розглядалися два підходи до моделювання турбулентних течій – RANS і DDES. Згідно з отриманими даними найменші відносні відхилення результатів експериментальних і розрахункових досліджень мають місце при використанні SST – $k-\omega$ моделі турбулентності у разі застосування DDES підходу та RNG – $k-\varepsilon$ моделі для RANS підходу.

За результатами виконаного аналізу показано також, що застосування DDES підходу має переваги перед використанням RANS підходу та забезпечує краще узгодження даних комп'ютерного моделювання з результатами експериментальних досліджень.

Достовірність одержаних даних комп'ютерного моделювання підтверджується зіставленням результатів виконаних експериментальних і розрахункових досліджень та порівнянням з розв'язками, отриманими методом прямого числового моделювання (DNS). На рис. 2 до прикладу наводяться значення температур в характерних точках зони зворотних токів у закормовій області циліндричного стабілізатора полум'я за результатами експериментальних і розрахункових (у прямокутниках) досліджень. Для розглянутих умов відносна похибка числової моделі не перевищувала 10%.

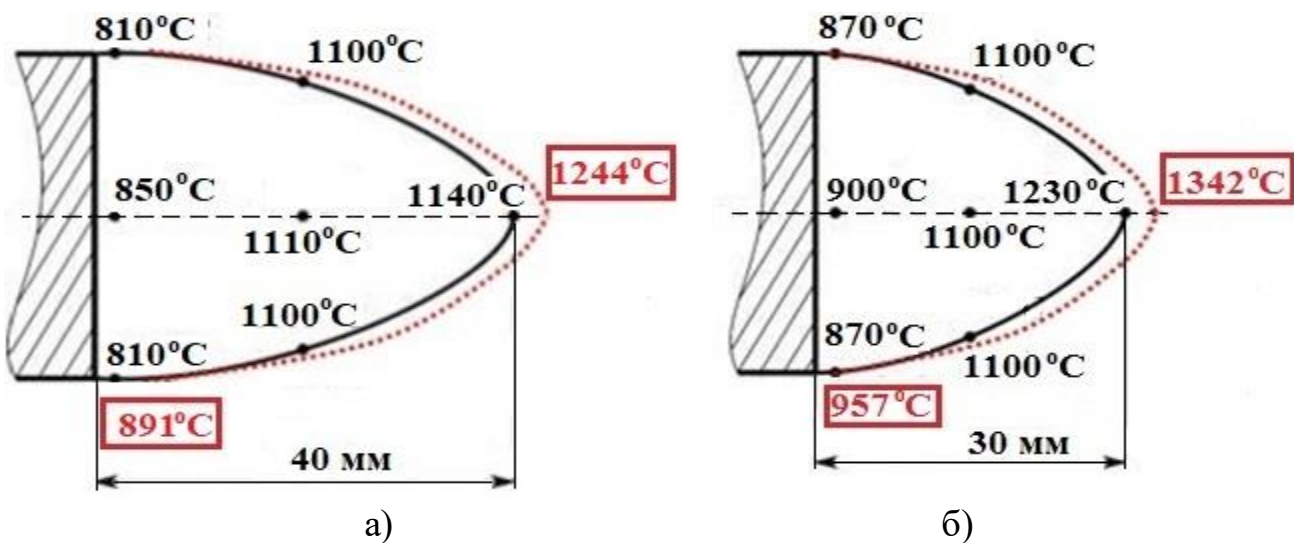
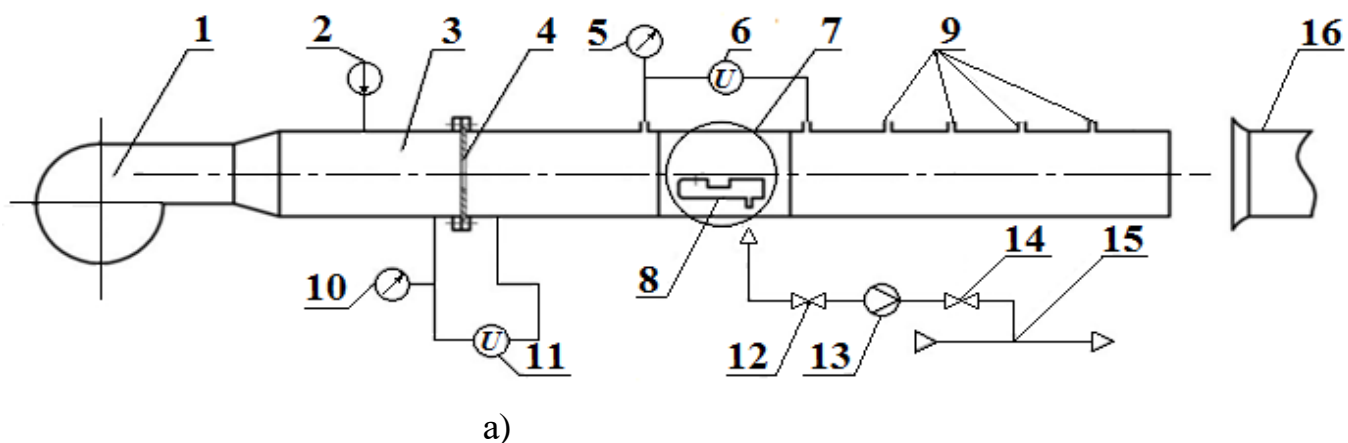


Рис. 2. Значення температур у характерних точках зони зворотних токів у закормовій області циліндричного стабілізатора полум'я за даними експериментальних і розрахункових (у прямокутниках) досліджень при $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $U_{\Pi}^{BX} = 10$ м/с; $\alpha = 6,72$ для $S/d = 1,5$ (а) та $S/d = 5$ (б).

У роботі достовірність отриманих числових розв'язків підтверджується також високою ефективністю впровадження запропонованих технічних рішень пальникових пристроїв.

Експериментальні дослідження робочих процесів у пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я виконувалися на стенді, схема якого наводиться на рис. 3, а.



б)

Рис. 3. Схема експериментального стенду (а) та фотореєстрація факела (б):

1 – вентилятор; 2 – термометр для вимірювання температури повітря; 3 – початкова ділянка; 4 – звужуючий пристрій; 5 – манометр вимірювання тиску на вході в мірну ділянку; 6 – дифманометр вимірювання опору випробовуваних циліндричних модулів; 7 – мірна ділянка, обладнана доступом для зондів відбору проб газового аналізу та вимірювальної апаратури, а також свічкою запалення; 8 – циліндричний стабілізатор; 9 – штуцери для відбору проб по довжині факела; 10 – манометр вимірювання тиску перед діафрагмою; 11 – дифманометр вимірювання перепаду тиску на діафрагмі; 12 – регулюючий газовий вентиль; 13 – мірна діафрагма витрати газу; 14 – запірний вентиль; 15 – газова магістраль; 16 – вхід в газовідвідний тракт.

У даному розділі подається опис вказаного стенду та відповідна методика проведення експериментів.

В третьому розділі наводяться результати досліджень робочих процесів мікрофакельних пальникових пристроїв з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я.

На першому етапі досліджень було виконано порівняльний аналіз закономірностей течії, сумішоутворення, вигорання палива і формування температурних полів зони горіння при застосуванні циліндричних і плоских стабілізаторів полум'я. До прикладу нижче наводяться результати математичного моделювання для досліджуваних пальників потужністю 90 кВт. У порівнюваних пальникових пристроях однаковими приймалися діаметр циліндричного і висота плоского стабілізаторів полум'я ($3,5 \cdot 10^{-2}$ м) та площі їхніх поперечних перерізів.

Рівними задавались також коефіцієнти загромождження прохідного перерізу каналу $k_f = 0,3$. Діаметр газоподавальних отворів d , і відносний крок S/d їх розташування для обох ситуацій вибирався, виходячи з того, щоб глибина проникнення струменів паливного газу дорівнювала приблизно 0,75 від висоти каналу.

Згідно з одержаними даними для пальників, що зіставляються, помітно відрізняються характеристики всіх елементів робочого процесу (див., наприклад, рис. 4 та 5). Так, течія у пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я у порівнянні з плоским характеризується у 1,8 рази меншою довжиною зони зворотних токів у закормовій області стабілізатора полум'я та в 1,6 рази більшим значенням модуля швидкості у даній зоні. Турбулізація потоку в ближньому сліді за циліндричним стабілізатором є більш значною (максимальні величини інтенсивності турбулентності на осі сліду приблизно на 20% вищі). При цьому втрати тиску у пальниковому пристрої нижчі на 12,5%.

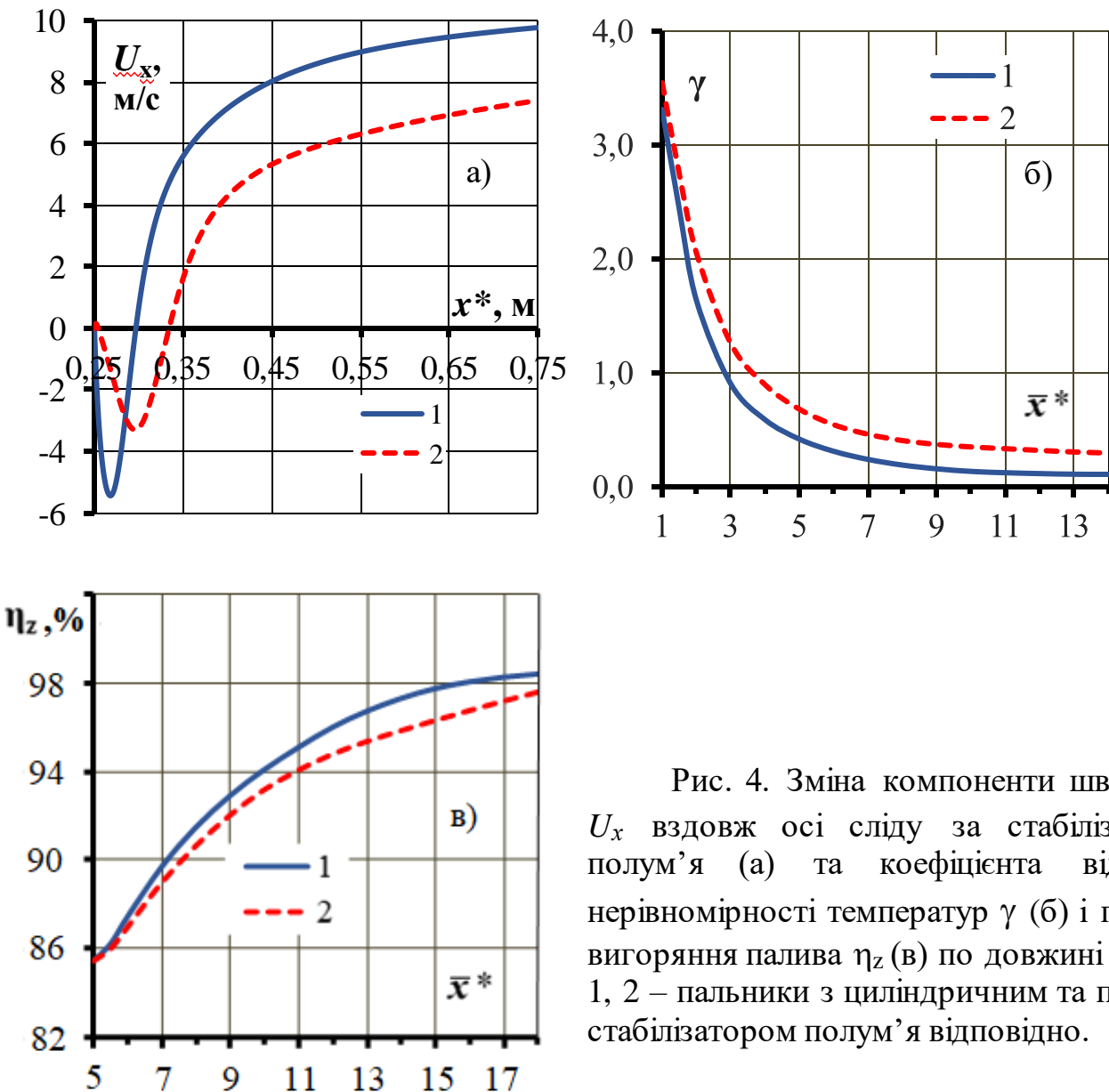


Рис. 4. Зміна компоненти швидкості U_x вздовж осі сліду за стабілізатором полум'я (а) та коефіцієнта відносної нерівномірності температур γ (б) і повноти вигорання палива η_z (в) по довжині факела: 1, 2 – пальники з циліндричним та плоским стабілізатором полум'я відповідно.

Щодо швидкості процесу сумішоутворення палива і окиснювача за довжиною пального пристрою, то у разі застосування циліндричного стабілізатора полум'я вона виявляється суттєво вищою. Для пальників з циліндричними стабілізаторами нерівномірність поля температур у поперечних перерізах факела є менш значною, ніж для відповідних пальників з плоскими стабілізаторами полум'я (рис. 4, б). Так, значення коефіцієнта нерівномірності поля температур γ знижується до величини 0,3 на відстані \bar{x} від зривної кромки стабілізатора, що дорівнює приблизно 6,0 і 12,5 його калібрів для циліндричного і плоского стабілізаторів полум'я відповідно.

Як свідчать отримані дані, інтенсивність процесу вигорання палива теж суттєво залежить від форми стабілізатора полум'я (рис. 4, в). У ближньому сліді за стабілізатором з віддаленням від його зривної кромки розбіжність порівнюваних коефіцієнтів повноти вигорання палива η_z зростає. У разі пального пристрою з циліндричним стабілізатором полум'я процес вигорання палива відбувається помітно інтенсивніше.

Отже, згідно з результатами виконаних досліджень, паликові пристрої з циліндричними стабілізаторами полум'я у порівнянні з відповідними пальниками з плоскими стабілізаторами характеризуються значно більшою турбулізацією потоку в закормовій області стабілізатора і суттєво вищою інтенсивністю протікання процесів сумішоутворення та вигорання палива.

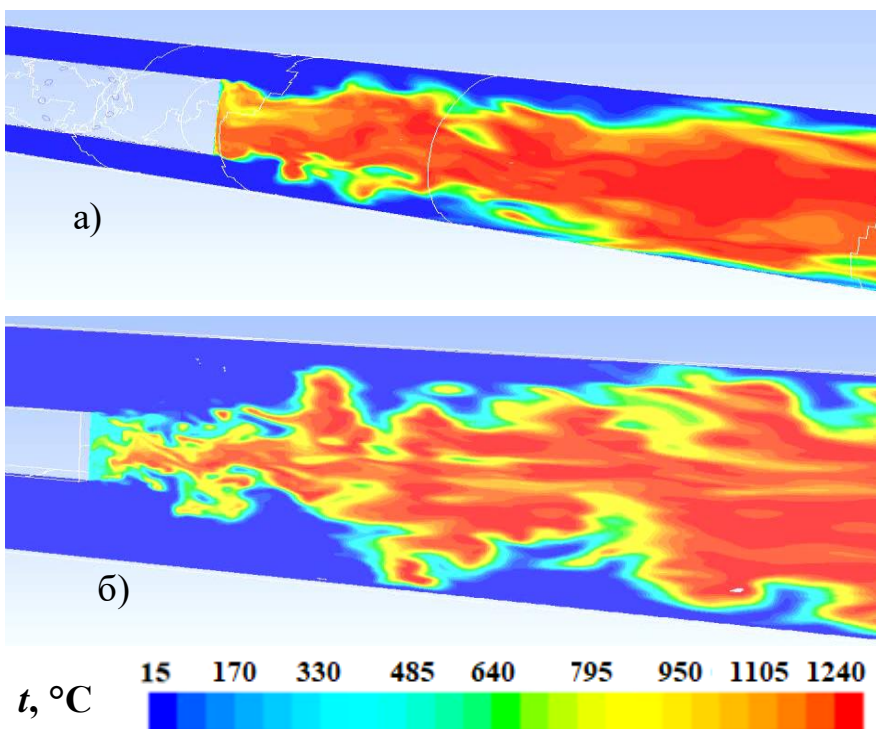


Рис. 5. Поле миттєвих значень температури у поздовжніх перерізах пальників з циліндричним (а) та плоским (б) стабілізаторами полум'я.

В роботі для типоряду паликових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю 30-200 кВт виконано комплекс багатоваріантних параметричних досліджень робочих процесів цих пристроїв. На основі отриманих даних визначено раціональні конструктивні і режимні параметри пальників розглянутого типоряду (табл. 1).

Таблиця 1.

Основні параметри типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю 30-200 кВт

Конструктивні параметри					
$N_{п}$, кВт	$d_{ст}$, м	D , м	d , м	N	S/d
30	0,02	0,0365	0,002	9	3,50
110	0,04	0,073	0,003	13	3,22
155	0,05	0,091	0,0035	14	3,20
200	0,06	0,1095	0,004	15	3,14
Режимні параметри у номінальному режимі при $\alpha=1,1$					
$N_{п}$, кВт	$G_{г}$, м ³ /год	$G_{п}$, м ³ /год	$U_{г}^{вх}$, м/с	$U_{п}^{вх}$, м/с	
30	2	32,3	29,49	12,28	
110	11	118,6	33,27	11,25	
155	15,5	167,1	31,98	10,23	
200	20	215,6	29,49	9,09	

Як видно, має місце досить чітко виражена кореляція між потужністю пальникового пристрою і геометричними характеристиками відповідних конструкцій. А саме, росту потужності пальника відповідає збільшення діаметрів циліндричного стабілізатора та газоподавальних отворів і зменшення відносного кроку їх розташування.

Для пальників запропонованого типоряду виконано дослідження щодо порівняльного аналізу характеристик течії і сумішоутворення палива та окиснювача (див. до прикладу рис. 6 і 7). За результатами досліджень картини течії, зокрема, показано, що зі зростанням потужності пальникового пристрою збільшується протяжність зон зворотних токів $L_{зт}$ у закормових областях стабілізаторів, зменшуються абсолютні значення максимальних швидкостей U_{max} у цих зонах і спостерігається тенденція до підвищення рівня турбулізації потоку на деякій відстані від стабілізатора полум'я. Так, зі збільшенням потужності пальника від 30 до 200 кВт значення $L_{зт}$ зростає у 3,2 рази, а величина U_{max} зменшується у 1,45 рази.

Щодо сумішоутворення палива і окиснювача, то згідно з отриманими даними в усіх пальниках розглянутого типоряду реалізується сприятлива картина сумішоутворення. При цьому з підвищенням потужності пальникового пристрою все більша частина процесу сумішоутворення виноситься за межі власне пальника у топковий простір (рис. 7).

Певну увагу в роботі приділено аналізу можливості регулювання процесу сумішоутворення і відповідно створення факела різної довжини за допомогою варіювання відстані L_1^* від місця виходу газу до устя пальника.

Для розглянутого типоряду пальникових пристроїв визначено умови, за яких до устя пальника надходить суміш високого ступеня змішування паливного газу з повітрям, так що практично весь поперечний переріз пальника, який проходить через

зривну кромку стабілізатора, зайнятий сумішшю, що відповідає концентраційним межам запалення.

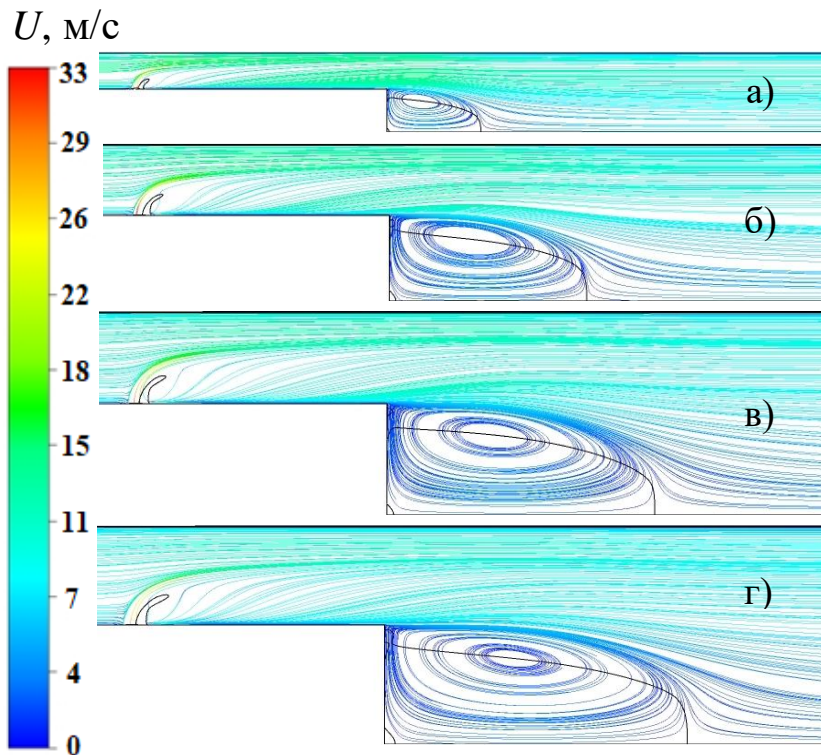
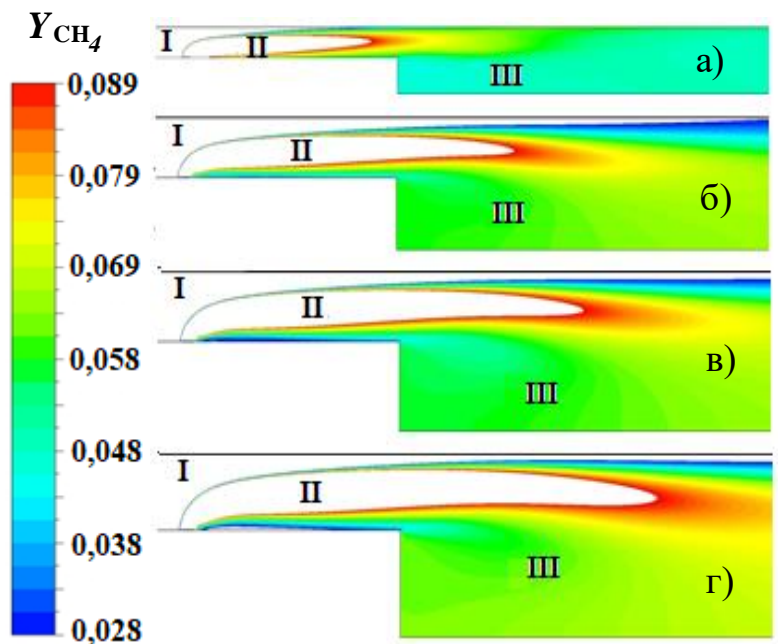


Рис. 6. Лінії току в поздовжніх перерізах $\varphi = 0$, що проходять через вісь газоподавальних отворів пальників з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я різної потужності: $N_{\text{п}} = 30$ кВт (а); 110 кВт (б); 155 кВт (в); 200 кВт (г).

Виконані дослідження показали, що величина L_1^* , при якій реалізується такий ступінь змішаності в усті пальника, є різною для пальників різної потужності і збільшується з ростом останньої. Однак при цьому практично однаковим для різних пальників типоряду і рівним приблизно 35 є відношення відстані L_1^* до діаметру газоподавальних отворів (табл. 2).

Рис. 7. Поля масової концентрації метану в поздовжніх перерізах циліндричного пальникового пристрою $\varphi = 0$, що проходять через вісь газоподавальних отворів пальників з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я різної потужності: $N_{\text{п}} = 30$ кВт (а); 110 кВт (б); 155 кВт (в); 200 кВт (г); I, II – зони з надлишковим вмістом повітря і природного газу відповідно; III – зона утворення суміші в концентраційних межах займання.



Таблиця 2.

Значення абсолютної L_1^* і відносної L_1^*/d відстані між газоподавальними отворами і зривною кромкою стабілізатора полум'я, при якій в усті пальника суміш відповідає концентраційним межам займання

$N_{п}$, кВт	30	110	155	200
L_1^* , м	0,070	0,105	0,1225	0,140
d , м	0,002	0,003	0,0035	0,004
L_1^*/d	35	35	35	35

В роботі виконано експериментальні дослідження характеристик займання і зриву горіння для пальників з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я. Досліджено вплив на вказані характеристики геометричних параметрів пальників, таких як відносний крок розташування газоподавальних отворів S/d , відстань L_1^* від цих отворів до зривної кромки стабілізатора полум'я тощо. Відмічається, що характеристики займання для досліджуваних пальників корелюються певним чином з характеристиками бідного зриву. На рис. 8 до прикладу наводяться характеристики займання при різних значеннях величини S/d . Як свідчать одержані дані, займання палива поліпшується зі зменшенням відстані між газоподавальними отворами.

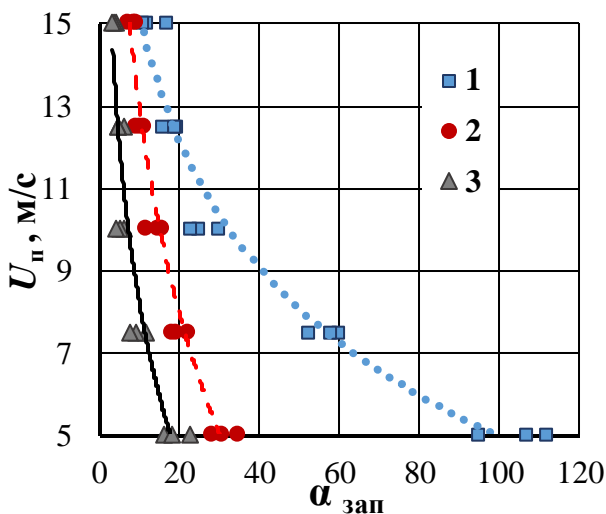


Рис. 8. Характеристики займання для пальника з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я при $L_1^*=0,015$ м:
1- $S/d=4,0$; 2- $S/d=5,0$; 3- $S/d=6,5$.

Четвертий розділ присвячено дослідженням робочих процесів у пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності кільцевих нішових порожнин на їхніх бічних поверхнях. Застосування нішових порожнин є з одного боку засобом інтенсифікації процесу горіння, з іншого – слугує цілям стабілізації полум'я завдяки захопленню вихору цією порожниною.

В роботі з метою вибору раціональних конструктивних параметрів типоряду даної модифікації пальників виконано цикл досліджень процесів переносу в цих пальниках при варіюванні в певних межах їхніх основних геометричних характеристик, таких як розміри ніші, її розташування відносно зривної кромки стабілізатора полум'я, відстань між газоподавальними отворами тощо.

Щодо визначення необхідних розмірів нішових порожнин для пальників різної потужності, то воно базувалося на результатах досліджень закономірностей течії в

цих пальників. Згідно з одержаними даними у разі застосування для всіх пальників типоряду нішових порожнин однакових розмірів $L \times H = 0,03 \times 0,06$ м протяжність первинного вихору в ніші є помітно коротшою, ніж її довжина. При цьому чим нижча потужність пальникового пристрою $N_{\text{п}}$, тим меншою є зазначена протяжність. Хоча для ефективного сумішоутворення і стабілізації полум'я в ніші зона первинного вихору в ній, як відомо, повинна займати основну частину простору ніші. За результатами виконаних досліджень структури течії в пальниках розглянутого типоряду визначено величини протяжності ніші, що задовольняють вказаній вимозі (табл. 3). Як видно з таблиці, відносна довжина кільцевої ніші \bar{L} ($\bar{L} = L/H$) змінюється в межах $3,0 \leq \bar{L} \leq 4,0$, що відповідає допустимому діапазону її зміни $2,5 \leq \bar{L} \leq 5,0$.

Таблиця 3.

Абсолютні L та відносні \bar{L} величини рекомендованих значень довжин нішової порожнини для типоряду циліндричних стабілізаторних пальникових пристроїв

$N_{\text{п}}$, кВт	30	110	155	200
L , м	0,018	0,021	0,0225	0,024
\bar{L}	3,0	3,5	3,75	4,0

Згідно з даними виконаних досліджень встановлено, що при збереженні в пальниках з нішовими порожнинами їхніх конструктивних параметрів такими ж, як і у разі відсутності ніш, сприятливий перебіг робочих процесів для пальників з нішами не забезпечується. Одержані за результатами виконаного моделювання рекомендовані значення цих параметрів наведено в табл. 4.

В роботі виконано зіставлення основних характеристик перебігу робочих процесів для типорядів досліджуваних пальників за наявності і відсутності нішових порожнин на їхніх бічних поверхнях. Стосовно картини течії у порівнюваних ситуаціях, то, як свідчать одержані дані, наявність ніші призводить до помітного підвищення інтенсивності турбулентності поблизу зовнішньої поверхні стабілізатора полум'я (рис. 9). Так, для пальникового пристрою потужністю $N_{\text{п}} = 110$ кВт у перерізі, що відповідає задній стінці ніші ($x = 0,225$ м), інтенсивність турбулентності приблизно вдвічі перевищує відповідні значення за відсутності ніші і становить 34%.

Таблиця 4.

Основні конструктивні параметри типоряду циліндричних стабілізаторних пальникових пристроїв з нішовими порожнинами потужністю від 30 до 200 кВт

$N_{\text{п}}$, кВт	$d_{\text{ст}}$, м	D , м	d , м	S/d	L_0 , м	L_1 , м
30	0,02	0,0365	0,002	3,50	0,015	0,049
110	0,04	0,073	0,003	3,22	0,025	0,062
155	0,05	0,091	0,0035	3,00	0,050	0,0885
200	0,06	0,1095	0,004	2,94	0,060	0,100

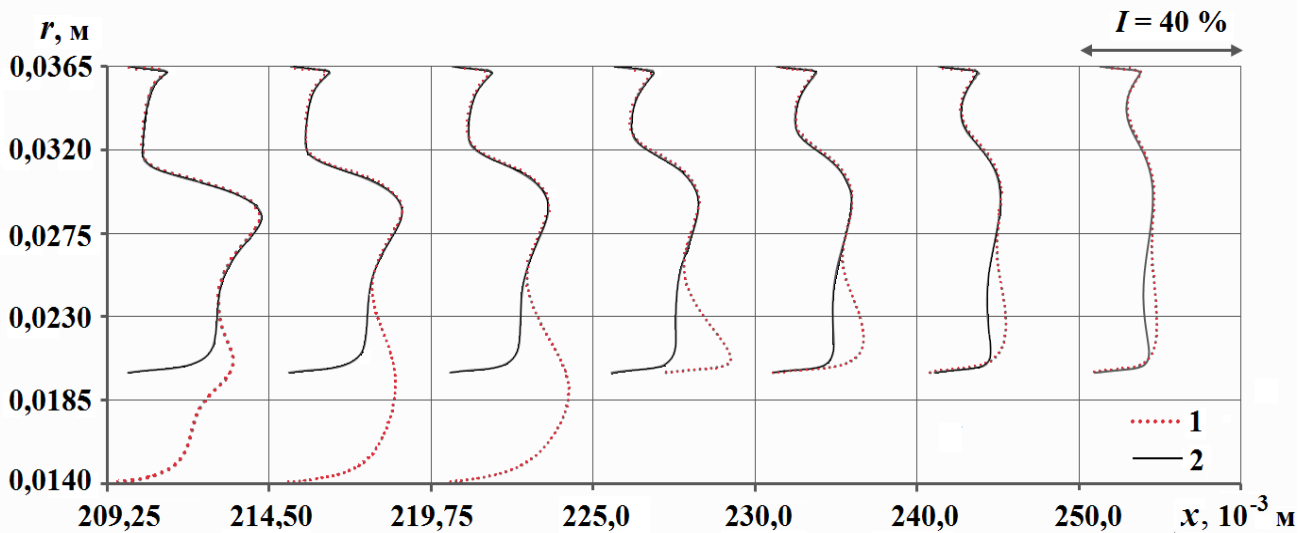
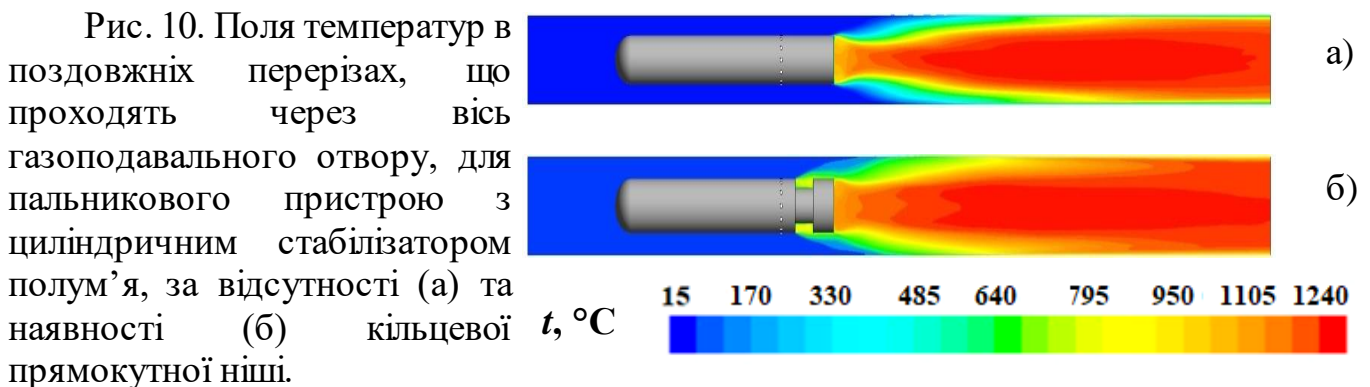


Рис. 9. Розподіл інтенсивності турбулентності за радіусом пальника потужністю $N_{\text{п}} = 110$ кВт за наявності (1) і відсутності (2) кільцевої ніші для $\varphi = 0$ у поперечних перерізах $x = 0,20925$ м (чверть довжини ніші); $x = 0,2145$ м (середина ніші); $x = 0,21975$ м (три чверті довжини ніші); $x = 0,225$ м (задня стінка ніші); $x = 0,230$ м; $x = 0,240$ м; $x = 0,250$ м (зривна кромка стабілізатора).

Одержані дані свідчать також, що втрати тиску у пальнику, пов'язані з наявністю кільцевих ніш, є порівняно незначними. Вони не перевищують 13% від відповідних втрат за відсутності ніші.

За результатами досліджень щодо аналізу картини сумішоутворення палива і окиснювача для модифікації типоряду пальникових пристроїв з кільцевими нішами показано, що з підвищенням потужності пальникового пристрою інтенсивність сумішоутворення в закормовій області стабілізатора полум'я знижується. Однак за наявності нішових порожнин дане зниження є менш значним, ніж у пальниках без ніш.

Щодо картини горіння в пальниках з кільцевими нішами, то воно починається у власне нішовій порожнині, поширюється уздовж зовнішньої поверхні стабілізатора і далі триває в його закормовій області. За відсутності кільцевої ніші початок горіння відповідає зривній кромці стабілізатора (рис. 10). Такий характер процесу горіння в ситуаціях, що зіставляються, зумовлює вищу інтенсивність вигорання палива і дещо більшу рівномірність поля температур в поперечних перерізах факела для пальників з кільцевими прямокутними нішами.



Згідно з результатами виконаних досліджень наявність нішових порожнин на бічних поверхнях циліндричних пальникових пристроїв зумовлює покращення їхніх стабілізаційних властивостей. При цьому дане покращення є тим значнішим, чим більша потужність пальникового пристрою розглянутого типоряду. Так, значення коефіцієнта надлишку повітря α_{max} на бідному зриві завдяки застосуванню нішових порожнин збільшується на 16% при потужності пальникового пристрою 30 кВт і на 24% - при потужності 200 кВт.

П'ятий розділ присвячено дослідженням робочих процесів пальникових пристроїв з пластинчастими турбулізаторами потоку, встановленими на їхніх зривних кромках. Основні характеристики цих турбулізаторів для розглянутого типоряду пальників наведено в табл. 5. Ширина турбулізаторів B_T вибиралася з міркувань, згідно з якими коефіцієнт загромодження ними поперечного перерізу каналу для пальників різної потужності був однаковим і становив приблизно 0,2. Щодо кількості турбулізаторів, то тут має місце тенденція до їх збільшення з підвищенням потужності пальникового пристрою.

Таблиця 5.

$N_{п}$, кВт	n	B_T , $10^{-3}м$
30	3	6
110	4	9
155	5	9
200	5	11

Кількість n і ширина B_T пластинчастих турбулізаторів потоку, що встановлюються на зривних кромках стабілізаторів полум'я, для типоряду циліндричних пальникових пристроїв потужністю 30-200 кВт

В роботі виконано дослідження щодо порівняльного аналізу характеристик процесів переносу в пальниках за наявності і відсутності турбулізаторів потоку.

Стосовно структури течії у двох розглянутих ситуаціях, то у разі наявності турбулізаторів за кожним з них утворюється зона рециркуляції, протяжність якої суттєво перевищує відповідну протяжність такої зони у закормовій області стабілізатора за відсутності турбулізаторів потоку (рис. 11). Так, для пальника потужністю 110 кВт протяжність зони рециркуляції за турбулізаторами потоку становить 0,116 м, а відповідної зони за стабілізатором полум'я, на задній кромці якого не встановлені турбулізатори, – лише 0,0475 м.

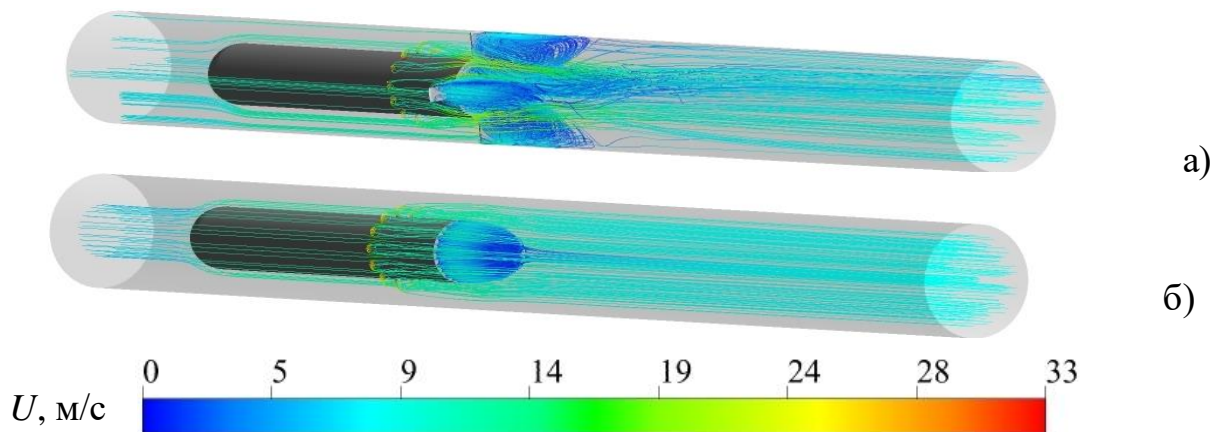


Рис. 11. Картина ліній току для циліндричного пальникового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а) і відсутності (б) турбулізаторів потоку.

Щодо рівня пульсаційних складових швидкості для порівнюваних ситуацій, то за наявності турбулізаторів він є суттєво вищим в значній частині потоку за стабілізатором полум'я. При цьому істотно відрізняється і характер полів пульсацій швидкості (див., наприклад, рис. 12). Як видно, максимальні рівні середньоквадратичних значень пульсацій швидкості становлять 4,5 м/с та 2,8 м/с за наявності і відсутності турбулізаторів потоку відповідно.

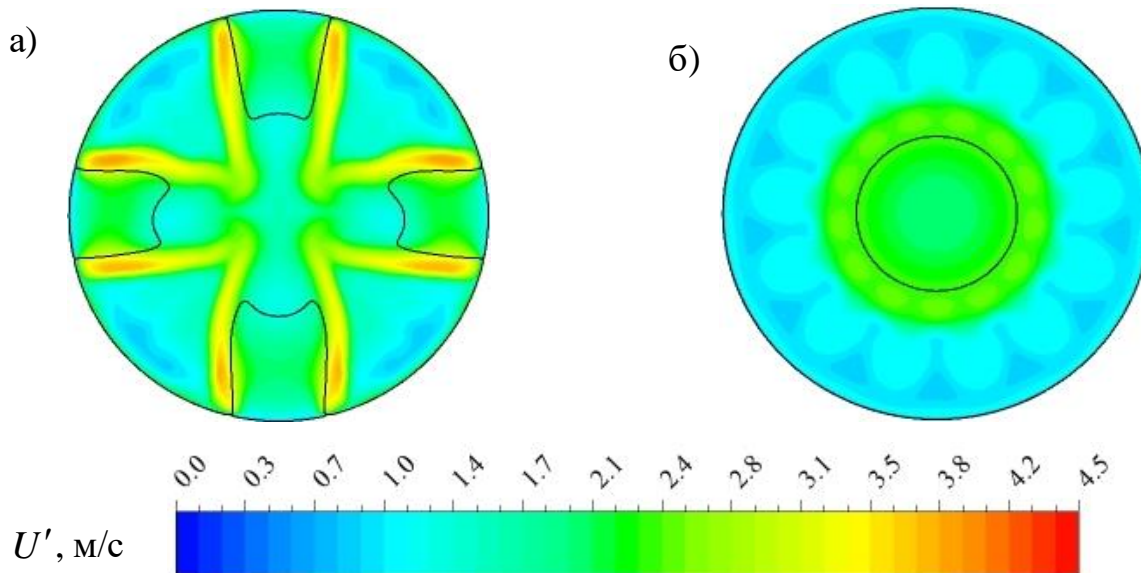


Рис. 12. Поля середньоквадратичних значень пульсацій швидкості U' в поперечному перерізі $x = 0,275$ м для паликового пристрою потужністю 110 кВт за наявності (а) і відсутності (б) турбулізаторів потоку.

Згідно з одержаними даними застосування турбулізаторів потоку суттєво впливає і на характеристики процесу сумішоутворення палива і окиснювача, підвищуючи його інтенсивність.

Щодо особливостей процесу горіння за наявності і відсутності турбулізаторів потоку, то в першому випадку, зважаючи на істотне збільшення периметра підпалювання, горіння починається на значній частині перерізу, що відповідає зривній кромці стабілізатора. За відсутності ж турбулізаторів початок горіння відповідає лише площі торцевої поверхні стабілізатора. Дана обставина поряд з суттєвою турбулізацією потоку призводить до значного підвищення інтенсивності вигорання палива і помітного зниження нерівномірності поля температур у поперечних перерізах факела при встановленні турбулізаторів потоку на зривній кромці стабілізатора полум'я.

В роботі виконано дослідження щодо зіставлення картин течії для всіх пальників типоряду з турбулізаторами потоку. Згідно з одержаними даними для пальників різної потужності турбулізація потоку виявляється найбільш суттєвою поблизу границь зон зворотних токів за турбулізаторами. Картину зміни інтенсивності турбулентності

вздовж осі сліду за стабілізатором полум'я для пальникових пристроїв різної потужності ілюструє рис. 13. Як видно, зменшення впливу турбулізаторів потоку на величину інтенсивності турбулентності з віддаленням від торця стабілізатора полум'я є суттєвішим для пальників меншої потужності.

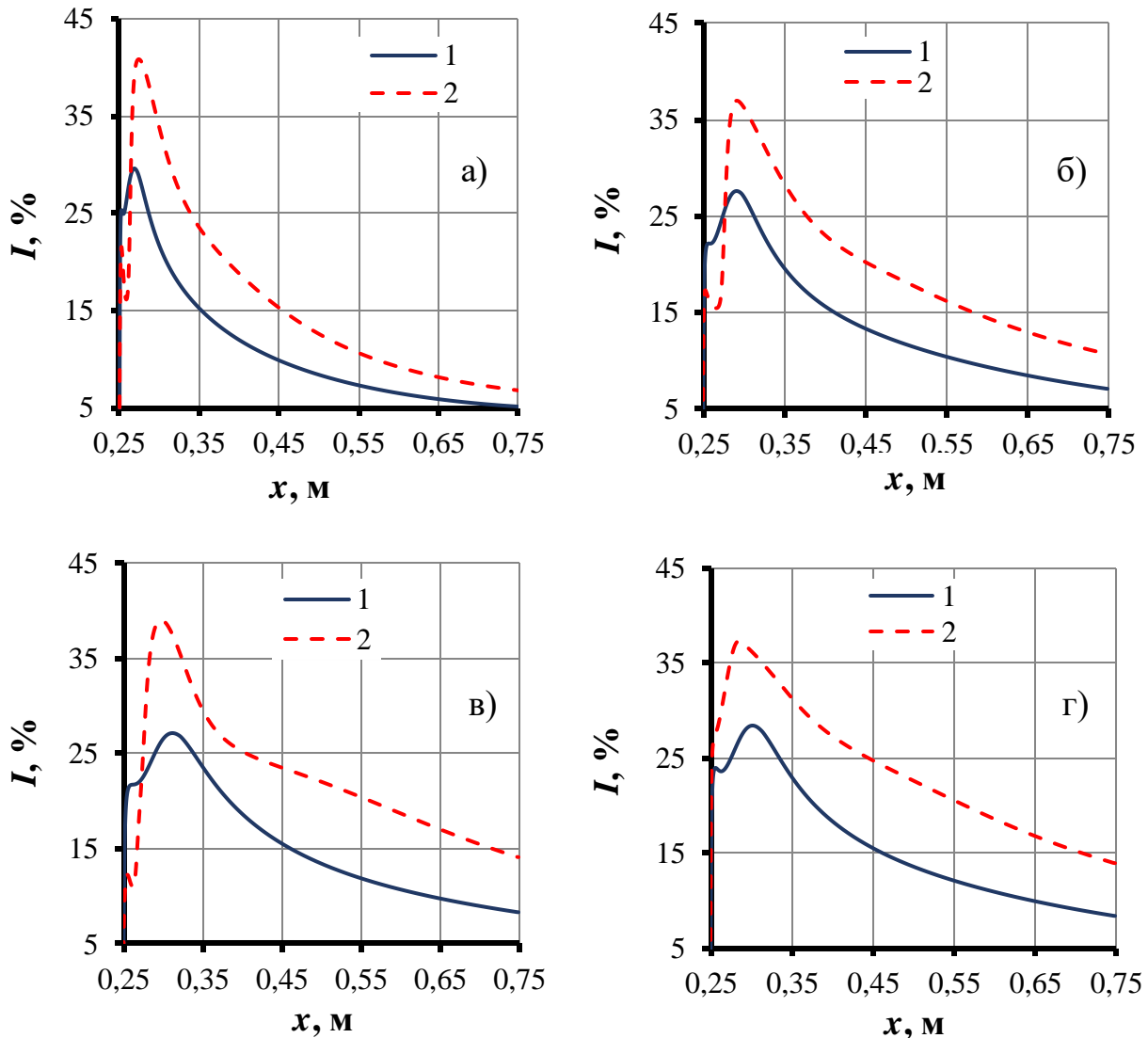


Рис. 13. Зміна інтенсивності турбулентності вздовж осі сліду за циліндричним стабілізатором полум'я за наявності (2) і відсутності (1) турбулізаторів потоку для пальників різної потужності: $N_{\text{п}} = 30$ кВт (а); $N_{\text{п}} = 110$ кВт (б); $N_{\text{п}} = 155$ кВт (в); $N_{\text{п}} = 200$ кВт (г).

Порівняльний аналіз картини сумішоутворення для типоряду пальників з турбулізаторами потоку різної потужності показав, що зі зростанням потужності пальникового пристрою інтенсивність змішування палива і повітря в цілому знижується (див, наприклад, рис. 14). Однак за наявності турбулізаторів потоку це зниження є менш значним, ніж для пальників без турбулізаторів.

На основі виконаних досліджень розроблено рекомендації щодо застосування різних модифікацій типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я.

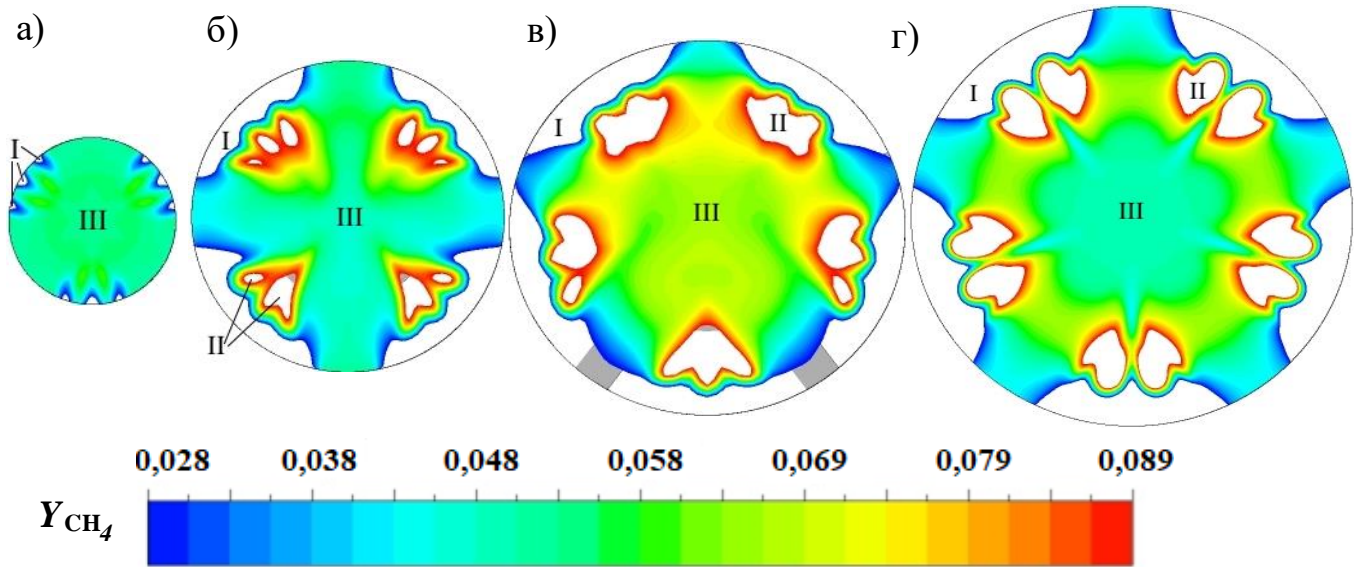


Рис. 14. Поля масової концентрації метану в поперечному перерізі $x=0,275$ м для циліндричних пальникових пристроїв з турбулізаторами потоку різної потужності: $N_{п} = 30$ кВт (а); $N_{п} = 110$ кВт (б); $N_{п} = 155$ кВт (в); $N_{п} = 200$ кВт (г); I, II – зони з надлишковим вмістом повітря і природного газу відповідно; III – зона утворення суміші в концентраційних межах займання.

Результати досліджень впроваджено в НВК «Струменево-нішова технологія» на сушарках фасонних елементів футеровки енергетичного обладнання, котлах типу НПСТУ, Е-1,0-0, 9ГН-2 та інших.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено основні положення теплофізики спалювання газу в мікрофакельних пальникових пристроях малої потужності із застосуванням різних модифікацій циліндричних стабілізаторів полум'я – гладких, з кільцевими прямокутними нішами на бічних поверхнях стабілізаторів та з турбулізаторами потоку на їхніх зривних кромках.

2. Виконано порівняльний аналіз робочих процесів пальників з плоскими і гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я. Встановлено, що форма стабілізатора полум'я спричиняє значний вплив на характеристики всіх елементів робочого процесу досліджуваних пальників. Показано, що у порівнюваних ситуаціях суттєво відрізняються параметри циркуляційних течій в закормових областях стабілізаторів. У пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я має місце підвищення рівня турбулізації потоку і відповідна інтенсифікація процесів сумішоутворення палива та окиснювача і вигорання палива. Так, для пальникового пристрою потужністю $N_{п} = 90$ кВт: у 1,8 рази скорочується протяжність зони зворотних токів за стабілізатором; в 1,6 рази збільшується значення модуля максимальної швидкості в цій зоні; більш ніж на 20 % зростають максимальні

величини інтенсивності турбулентності у ближньому сліді за стабілізатором; зменшуються втрати тиску за трактом окиснювача на 12,5 % тощо.

3. Для типоряду пальникових пристроїв з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю від 30 до 200 кВт виконано комплекс досліджень їх робочих процесів. При цьому:

а) за результатами досліджень визначено раціональні конструктивні і режимні параметри пальників. Встановлено наявність чіткої кореляції між потужністю пальника N_p і його геометричними характеристиками. А саме, зростанню потужності N_p з 30 до 200 кВт відповідає збільшення діаметру циліндричного стабілізатора полум'я від $2,0 \cdot 10^{-2}$ м до $6,0 \cdot 10^{-2}$ м, діаметру газоподавальних отворів – з $2,0 \cdot 10^{-3}$ м до $4,0 \cdot 10^{-3}$ м і зменшенню відносного кроку їх розташування від 3,5 до 3,14;

б) на основі зіставлення закономірностей перебігу робочих процесів у пальниках різної потужності, зокрема, показано, що зі збільшенням потужності N_p спостерігається тенденція до підвищення рівня турбулізації потоку на деякій відстані від стабілізатора полум'я та все більша частина процесу сумішоутворення палива і окиснювача виноситься за межі власне пальника у топковий простір;

в) досліджено можливість регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані L_1^* між газоподавальними отворами і зривною кромкою стабілізатора полум'я. Показано, що для забезпечення у пальниках досліджуваного типоряду, так званого внутрішнього сумішоутворення (коли у перерізі, що відповідає зривній кромці стабілізатора, має місце практично повне перемішування палива і окиснювача) газоподавальні отвори необхідно розміщувати на відстані L_1^* , що становить 0,07 м; 0,105 м; 0,1225 м і 0,14 м відповідно для пальників потужністю 30, 110, 155 і 200 кВт. Однак, практично однаковим для різних пальників типоряду і рівним приблизно 35 є відношення відстані L_1^* до діаметру газоподавальних отворів.

4. Виконано комплексні дослідження процесів переносу для модифікації типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності кільцевих прямокутних ніш на їх бічних поверхнях. В тому числі:

а) на основі CFD моделювання робочих процесів пальників цієї модифікації при варіюванні в певних межах їхніх основних геометричних характеристик (розмірів нішової порожнини, її розташування відносно зривної кромки стабілізатора полум'я, відстані між газоподавальними отворами тощо) здійснено вибір конструктивних параметрів даних пальникових пристроїв. Зокрема, визначено необхідні розміри нішових порожнин, виходячи з умови, згідно з якою первинний вихор у ніші повинен займати основну частину її простору для ефективного сумішоутворення і стабілізації полум'я в ніші. Показано, що відносна довжина кільцевої ніші \bar{L} має становити 3,0; 3,5; 3,75 і 4,0 відповідно для пальників потужністю 30; 110; 155 і 200 кВт;

б) встановлено закономірності впливу нішових порожнин на робочі процеси пальників пропонованого типоряду. Показано, що за наявності нішових порожнин на бічних поверхнях стабілізаторів полум'я відбувається суттєве (до двох разів) підвищення інтенсивності турбулентності поблизу зовнішньої поверхні стабілізаторів полум'я, помітне прискорення процесу сумішоутворення палива і окиснювача, більш ранній за течією початок горіння, вища інтенсивність вигорання палива і менший ступінь нерівномірності температурних полів у поперечних перерізах факелу. Встановлено, що пальники з кільцевими нішами характеризуються покращеними стабілізаційними властивостями. Так, значення коефіцієнту надлишку повітря α_{max} на бідному зриві збільшується на 16% при потужності пальникового пристрою 30 кВт і на 24 % при потужності 200 кВт. Показано також, що втрати тиску в пальниках, пов'язані з наявністю кільцевих ніш, є порівняно незначними і не перевищують 13%.

5. Для модифікації типоряду пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я та пластинчастими турбулізаторами потоку на їхніх зривних кромках досліджено закономірності аеродинаміки, сумішоутворення, вигорання палива і формування температурних полів в зоні горіння. За результатами виконаних досліджень, зокрема, показано, що встановлення турбулізаторів призводить до суттєвої зміни структури течії та інтенсифікації всіх елементів робочого процесу пальників. Так, для пальникових пристроїв досліджуваного типоряду потужністю від 30 до 200 кВт, оснащених турбулізаторами різних розмірів, за кожним з них утворюється зона рециркуляції, протяжність якої суттєво перевищує відповідно протяжність такої зони за відсутності турбулізаторів потоку. До прикладу, для пальника потужністю 110 кВт з чотирма турбулізаторами потоку на зривній кромці стабілізатора полум'я протяжність вказаної зони рециркуляції становить 0,116 м, а для такої зони за відсутності турбулізаторів – лише 0,0475 м. Показано, що ефект зниження впливу турбулізаторів з віддаленням від стабілізатора полум'я вниз за потоком є суттєвішим для пальників меншої потужності. Встановлено також, що втрати тиску в пальниковому пристрої, зумовлені наявністю турбулізаторів, є відносно незначними за величиною в усьому діапазоні зміни потужності пальникових пристроїв.

6. На основі виконаного комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень розроблено рекомендації щодо умов застосування різних модифікацій типоряду пальникових пристроїв, орієнтованих на використання у вогнетехнічних об'єктах невеликої потужності. Результати досліджень впроваджено в НВК «Струменево-нішова технологія» на сушарках фасонних елементів футеровки енергетичного обладнання, котлах типу НІСТУ, Е-1,0-0,9ГН-2 тощо.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

r, φ – полярні координати; x, x^* – поздовжні координати, що відраховуються від передньої і задньої кромки стабілізатора полум'я відповідно; $\bar{x} = \frac{x}{d_{\text{ст}}}$; $\bar{x}^* = \frac{x^*}{d_{\text{ст}}}$; $d_{\text{ст}}, D$ – діаметр стабілізатора полум'я і каналу пальника; d, S, N – діаметр, крок розташування газоподавальних отворів та їх кількість; k_f – коефіцієнт загромодження прохідного перерізу каналу; L_1^*, L_0 – відстань від зривної кромки стабілізатора до газоподавальних отворів і ніші відповідно; H, L – глибина і довжина ніші; $\bar{L} = \frac{L}{H}$; $B_{\text{т}}$ – ширина та кількість турбулізаторів потоку; t – температура; γ – коефіцієнт відносної нерівномірності поля температур; $U_{\text{п}}^{\text{вх}}$ – швидкість повітря на вході в канал; $U_{\text{г}}^{\text{вх}}$ – середня швидкість газу в газоподавальних отворах; U, U' – швидкість та середньоквадратичне значення пульсацій швидкості; U_x – поздовжня компонента вектора швидкості; $G_{\text{г}}, G_{\text{п}}$ – масові витрати газу і повітря; η_z – коефіцієнт повноти вигорання палива; $\alpha, \alpha_{\text{зап}}$ – коефіцієнт надлишку повітря та його величина в режимі запалення; $N_{\text{п}}$ – потужність пальникового пристрою.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. 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. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т.3, №8(69). С. 40-44. (Внесок здобувача: участь у постановці задачі та аналізі даних математичного моделювання).
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. & Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24.5. С. 136-142. (Внесок здобувача: участь у проведенні обчислюваних експериментів, обробці та аналізі результатів).
3. Фіалко Н.М., Малецкая О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Компьютерное моделирование температурных полей продуктов горения в цилиндрических горелочных устройствах стабилизаторного типа. *Международный научный журнал «Интернаука»*. 2019. Том 1, №17 (79). С.49-53. (Внесок здобувача: участь у розрахункових дослідженнях та підготовка матеріалів до публікації).
4. 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. Вип. 24.6. С. 114-121. (Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження та проведенні обчислюваних експериментів).
5. Фіалко Н.М., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Іваненко Г.В., Юрчук В.Л., Ганжа М.В., Дончак М.І., Абдулін М.З. & Тимощенко О.Б. Особливості аеродинаміки пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2016. №252. С.52-61. (Внесок здобувача: участь у проведенні комплексу обчислюваних експериментів і аналізі отриманих даних).
6. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Ганжа М.В., Реграгі А. & Тимощенко О.Б. Аналіз можливостей регулювання процесу сумішоутворення в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я. *Міжнародний науковий журнал «Интернаука»*. 2020. №12 (92). С.49-53. (Внесок здобувача: участь у розробці та реалізації методики дослідження, обробці та узагальненні результатів).
7. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Юрчук В.Л., Г.В. Іваненко, А. В. Клищ & Тимощенко О.Б. Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017.

- Т.27, № 3. С. 131-135. (*Внесок здобувача: участь у комп'ютерному моделюванні, аналізі результатів та підготовка матеріалів до публікації*).
8. Фіалко Н.М., Малецькая О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Закономерности выгорания топлива в микрофакельных горелках с турбулизаторами потока. *Международный научный журнал "Интернаука"*. 2019. Том 1, №17 (79). С. 49-53. (*Внесок здобувача: участь у постановці задачі та аналізі результатів математичного моделювання*).
 9. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Сірій О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А., Кліщ А.В., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я. & Тимощенко О.Б. Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. *Науковий вісник НЛТУ*. 2018. Т. 28, №3. С.97-100. (*Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень та обробці і аналізі результатів*).
 10. Фіалко Н.М., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Дашковська І.Л., Кліщ А.В., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко О.Б. Моделювання турбулентних течій в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності прямокутних нішових порожнин. *Міжнародний науковий журнал «Интернаука»*. 2020. № 12 (92). С. 43-46. (*Внесок здобувача: участь у розрахункових дослідженнях та підготовка матеріалів до публікації*).
 11. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С. & Тимощенко А.Б. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа. *Технологические системы*. 2012. № 1. С. 52-57. (*Внесок здобувача: участь у проведенні обчислюваних експериментів та аналізі результатів досліджень*).
 12. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Прокопов В.Г., Меранова Н.О., Алешко С.О., Полозенко Н.П., Стрижеус С.Н. & Тимощенко О.Б. Сравнительный анализ характеристик течения в горелках с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени в изотермических условиях и при горении топлива. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2016. Вип. 242. С. 33-40. (*Внесок здобувача: участь у комп'ютерному моделюванні, обробці та аналізі результатів*).
 13. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Абдулин М.З., Малецькая О.Е., Ночовный А.В. & Тимощенко А.Б. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. *Промышленная теплотехника*. 2012. №1. С. 72-76. (*Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження та проведенні обчислювальних експериментів*).
 14. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Альошко С.О., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С. & Тимощенко А.Б. Аналіз ефективності систем охолодження стабілізаторних пальникових пристроїв з направляючими дефлекторами. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теплоенергетика. Інженерія докільця. Автоматизація*. 2013. №758. С. 46-51. (*Внесок здобувача: участь у розрахункових дослідженнях та аналізі даних математичного моделювання*).
 15. Фіалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., & Тимощенко А.Б. Теплообменные процессы в цилиндрических горелочных устройствах с

нишевыми полостями. Промышленная теплотехника. 2016. Т.38, №6. С.3-11. (Внесок здобувача: участь у постановці задачі, проведенні комплексу обчислюваних експериментів та аналізі отриманих результатів).

16. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Мєранова Н. О., Майсон Н.В. & Тимощенко А.Б. Особенности течения в цилиндрических горелочных устройствах с пластинчатыми турбулизаторами потока. *Промышленная теплотехника*. 2017. №1. С.5-12. (Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, комп'ютерному моделюванні та обробці і аналізі результатів).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

17. Фіалко Н.М., Давыденко Б.В. & Тимощенко А.Б. Численное моделирование взаимодействия вертикально направленной струи с горизонтальным газовым потоком. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XVI международной конференции* (г. Севастополь, 6 – 10 июня 2006г.), Институт промышленной экологии. Киев: «ИПЦ АЛКОН». 2006. С.120-122.
18. Абдулин М.З., Фіалко Н.М., Мєранова Н.О. & Тимощенко А.Б. Характеристики устойчивости факела в микрофакельных горелочных устройствах. *Modern science: problems and innovations: II International scientific and practical conference* (Stokholm, 3-5 May 2020). Stokholm, Sweden. 2020. P.265-268.
19. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін. М.З. Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Стрижеус С.М., Єніна А.О. & Тимощенко О.Б. Математичне моделювання процесів сумішоутворення в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии*. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 114-117.
20. Фіалко Н.М., Мєранова Н.О., Майсон М.В., Іваненко Г.В., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Математическое моделирование течения в прямоугольных кольцевых нишах цилиндрических стабилизаторных горелочных устройств. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии*. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2017. С. 110-114.
21. Abdulin M., Fialko N., Meranova N., & Tymoshchenko O. Temperature regimes of circulating flows in the eastern regions of flame stabilizers. *Scientific achievements of modern society: 7th International scientific and practical conference* (Liverpool, 4-6 march 2020). Liverpool, United Kingdom. 2020. P.16-20.
22. Абдулин М.З., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Мєранова Н.О., Юрчук В.Л., Іваненко Г.В., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Характеристики течения в горелочном устройстве с угловыми турбулизаторами потока. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов, Институт промышленной экологии*. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2017. С. 99-101.
23. Фіалко Н.М., Іваненко Г.В., Майсон Н.В., Полозенко Н.П., Юрчук В.Л., Клищ А.В., Рокитько К.В., Дончак М.И. & Тимощенко А.Б. Температурные поля в зоне горения для горелочных устройств с плоскими и цилиндрическими стабилизаторами пламени. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов*

- енергетики*: сборник трудов, Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2018. С.74-78.
24. Фиалко Н.М., Малецкая О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов горения в микрофакельных горелочных устройствах. *Актуальные проблемы современной науки: XLV Международная научно-практическая конференция (Харьков–Вена–Берлин–Астана, 28 ноября 2019 г.)*. 2019. С. 22-23.
25. Бутовський Л.С., Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Зарицький О.А., Шеренковський Ю.В. & Тимощенко О.Б. Експериментальні дослідження структури течії у пальникових пристроях стабілізаторного типу з застосуванням кутових турбулізаторів потоку. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: матеріали ХХІІ міжнародної конференції (г. Ялта, 8-12 юніа 2012 г.)*, Інститут промислової екології. Київ: «ІПЦ АЛКОН». 2012. С. 141-145.
26. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Хомук С.В., Єніна А.О., Новицький В.С. & Тимощенко О.Б. Підвищення інтенсивності процесів переносу в циліндричному стабілізаторному пальнику шляхом застосування прямокутних кільцевих ніш. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: сборник трудов, Інститут промислової екології. Київ: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 122-125.*
27. Фиалко Н.М., Малецкая О.Е., Полозенко Н.П., Реграги А., Ганжа М.В. & Тимощенко А.Б. Тепловое состояние зоны горения цилиндрических микрофакельных горелочных устройств. *Актуальные проблемы современной науки: XLV Международная научно-практическая конференция (Харьков–Вена–Берлин–Астана, 28 ноября 2019 г.)*. 2019. С. 20-21.
28. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Альошко С.А., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Полозенко Н.П., Ольховская Н.Н., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Моделирование структуры течения и смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа в условиях асимметричной подачи топлива. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: сборник трудов, Інститут промислової екології. Київ: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2019. С.62-66.*
29. Абдулин М.З., Фиалко Н.М., Серый А.А., Милко Е.И., Озеров А.А., Ольховская Н.Н., Швецова Л.А. & Тимощенко А.Б. Устойчивость факела в цилиндрических горелочных устройствах стабилизаторного типа. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: сборник трудов, Інститут промислової екології. Київ: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2018. С.79-82.*
30. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Юрчук В.Л., Новаковский М.А., Клищ А.В. & Тимощенко А.Б. Сравнительный анализ эффективности систем охлаждения стабилизаторных горелочных устройств при различной нагрузке котлоагрегата. *Проблеми промислової теплотехники: матеріали VІІ міжнародної конференції (г. Київ, 8-11 жовтня 2013 г.)*. Київ. (Електронне видання).
31. Фиалко Н.М., Меранова Н.О., Алешко С.А., Иваненко Г.В., Майсон Н.В., Хмиль Д.П. & Тимощенко А.Б. Характеристики течения топлива и окислителя в горелках стабилизаторного типа с нишевыми полостями. *Проблеми теплофізики та*

теплоенергетики: матеріали X міжнародної конференції (м. Київ, 23–25 травня 2017р). Київ. 2017. С. 30.

32. Прокопов В.Г., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Кутняк О.М. & Тимощенко О.Б. Математичне моделювання аеродинаміки та теплообміну в системах охолодження стабілізаторних пальникових пристроїв. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики*: матеріали XXI міжнародної конференції (г. Ялта, 7-11 юня 2011 г.). Інститут промислової екології. Київ: «ІПЦ АЛКОН». 2011. С. 177-179.
33. Фіалко Н. М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Рокитько К.В., Полозенко Н.П., Бутовський Л.С. & Тимощенко О.Б. Закономірності тепловіддачі на внутрішній поверхні стабілізаторів полум'я при застосуванні спеціальних систем охолодження мікрофакельних пальникових пристроїв. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики*: матеріали XXII міжнародної конференції (г. Ялта, 8-12 юня 2012 г.). Інститут промислової екології. Київ: «ІПЦ АЛКОН». 2012. С. 159-162.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

Патенти:

34. Патент на корисну модель № 143503, Україна. Пальниковий пристрій. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимощенко О.Б., Куник А.А. // опубл. 27.07.2020.

Основні результати у публікаціях відображені повно.

АНОТАЦІЯ

Тимощенко О.Б. Розроблення теплофізичних засад спалювання газу в мікрофакельних пальникових пристроях малої потужності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2020.

Дисертацію присвячено розробленню головних положень теплофізики спалювання газу в пальниках малої потужності. Виконано комплекс розрахункових і експериментальних досліджень робочих процесів таких пальників з різними модифікаціями циліндричних стабілізаторів полум'я – гладкими, з кільцевими прямокутними нішами на бічних поверхнях стабілізаторів та з турбулізаторами потоку на їх зривних кромках. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу процесів переносу в пальникових пристроях з плоскими і гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я. Наведено результати CFD моделювання робочих процесів типоряду пальників з гладкими стабілізаторами полум'я потужністю від 30 до 200 кВт. Проведено дослідження щодо встановлення закономірностей впливу кільцевих нішових порожнин на характеристики течії, сумішоутворення палива та окиснювача, вигорання палива і формування температурних полів в зоні горіння. Виконано зіставлення основних параметрів робочих процесів досліджуваних пальників за наявності і відсутності пластинчастих турбулізаторів потоку, встановлених на затуплених задніх кромках стабілізаторів полум'я. За результатами

виконаних досліджень визначено раціональні конструктивні та режимні параметри різних модифікацій типорядів пальників малої потужності і розроблено відповідні технічні рішення. Результати роботи впроваджено на сушарках фасонних елементів футеровки енергетичного обладнання, котлах типу НІСТУ, Е-1,0-0,9ГН-2 тощо.

Ключові слова: пальникові пристрої малої потужності, циліндричні стабілізатори полум'я, процеси спалювання газоподібного палива, аеродинаміка і теплообмін, комп'ютерне моделювання.

SUMMARY

Timoshchenko O.B. Development of thermophysical fundamentals for gas combustion in microjet burner devices of low power. - Manuscript.

The dissertation for the degree of Candidate 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, 2020.

The dissertation is devoted to the development of the main principals of the thermophysics of gas combustion in low-power burners. A complex of computational and experimental studies of the working processes of such burners with various modifications of cylindrical flame stabilizers - smooth, with annular rectangular niches on the side surfaces of the stabilizers and with flow turbulators on their stalling edges has been performed. Special attention is paid to the comparative analysis of transfer processes in burners with flat and smooth cylindrical flame stabilizers. The results of CFD modeling of working processes for a series of burners with smooth flame stabilizers with a power from 30 to 200 kW are presented. A study to establish the regularities of the effect of annular niche cavities on the characteristics of flow, mixture formation of fuel and oxidizer, fuel burnout and formation of temperature fields in the combustion zone was carried out. Comparison of the main parameters of the working processes of the investigated burners in the presence and absence of plate flow turbulators installed on the trailing edges of the flame stabilizers is carried out. Based on the results of the studies performed, the efficient design and operating parameters of various modifications of the series of low-power burners were determined and the corresponding technical solutions were developed. The results of the work were introduced on dryers of shaped elements of the lining of power equipment, boilers such as NIISTU, E-1.0-0.9GN-2, etc.

Key words: low-power burners, cylindrical flame stabilizers, combustion of gaseous fuel, aerodynamics and heat transfer, computer simulation.