

Технічні науки

УДК 536.24:533

Фіалко Наталія Михайлівна

*доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України, завідувача відділом
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Фиалко Наталия Михайловна,

*доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент НАН Украины, заведующая отделом
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Fialko Nataliia

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Head of Department
Institute of Technical Thermophysics of the
National Academy of Sciences of Ukraine*

Полозенко Ніна Петрівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Полозенко Нина Петровна

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Polozenko Nina

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher
Institute of Technical Thermophysics of the
National Academy of Sciences of Ukraine*

Кутняк Ольга Миколаївна

науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Кутняк Ольга Николаевна

научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Kutnyak Olha

Senior Researcher

Institute of Technical Thermophysics of the

National Academy of Sciences of Ukraine

Тимошенко Олександра Борисівна

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Тимошенко Александра Борисовна

младший научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Tymoshchenko Oleksandra

Junior Research

Institute of Technical Thermophysics of the

National Academy of Sciences of Ukraine

Кліщ Андрій Володимирович

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Клиш Андрей Владимирович

младший научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Klishch Andriy

Junior Research

*Institute of Technical Thermophysics of the
National Academy of Sciences of Ukraine*

Реграгі Абубакр

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Реграги Абубакр

младший научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Regragui Aboubakr

Junior Research

*Institute of Technical Thermophysics of the
National Academy of Sciences of Ukraine*

Ганжа Марк Володимирович

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Ганжа Марк Владимирович

младший научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Hanzha Mark

Junior Research

*Institute of Technical Thermophysics of the
National Academy of Sciences of Ukraine*

**МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ
ПАЛЬНИКАХ З ЦИЛІНДРИЧНИМИ СТАБІЛІЗАТОРАМИ ПОЛУМ’Я
ЗА НАЯВНОСТІ ПРЯМОКУТНИХ НІШОВИХ ПОРОЖНИН
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В
МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛКАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ
СТАБИЛИЗАТОРАМИ ПЛАМЕНИ ПРИ НАЛИЧИИ
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ НИШЕВЫХ ПОЛОСТЕЙ
MODELING OF TURBULENT FLOWS IN MICROJET BURNERS BY
USING CYLINDRICAL FLAME STABILIZERS WITH RECTANGULAR
NICHE CAVITIES**

***Анотація.** Наведено результати комп’ютерного моделювання аеродинаміки для пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум’я. Приводяться дані порівняльного аналізу характеристик течії за наявності та відсутності нішових порожнин на бічних поверхнях стабілізаторів.*

***Ключові слова:** циліндричні стабілізатори полум’я, нішові порожнини, інтенсивність турбулентності.*

***Аннотация.** Представлены результаты компьютерного моделирования аэродинамики для горелочных устройств с цилиндрическими стабилизаторами пламени. Приводятся данные сравнительного анализа характеристик течения при наличии и отсутствии нишевых полостей на боковых поверхностях стабилизаторов.*

***Ключевые слова:** цилиндрические стабилизаторы пламени, нишевые полости, интенсивность турбулентности.*

Summary. The results of computer modeling of the aerodynamics of burners with cylindrical flame stabilizers are presented. The data of a comparative analysis characteristics of current in the presence and absence of niche cavities on the side surfaces of the stabilizers are fetched.

Key words: cylindrical flame stabilizers, niche cavities, turbulence intensity.

Вступ. Важливими напрямками підвищення ефективності теплоенергетичного устаткування є використання прогресивних технологій спалювання палива [1-5], утилізації теплових викидів [6-10], застосування нових матеріалів тощо [10-15].

Щодо технологій спалювання палива, то в останній період широке застосування набувають мікрофакельні пальники різних конструкцій. В даній роботі виконано дослідження закономірностей течії в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я. При цьому основна увага приділяється порівняльному аналізу характеристик течії за наявності та відсутності нішових порожнин на бічних поверхнях стабілізаторів полум'я. Застосування цих порожнин є, як відомо, одним із засобів інтенсифікації процесу горіння. Крім того їх використання слугує цілям покращення стабілізації полум'я завдяки захопленню вихору нішовою порожниною.

Методика досліджень. Розглядається пальниковий модуль, який представляє собою круглий канал з розміщеним в ньому циліндричним стабілізатором із заокругленою передньою і затупленою задньою кромкою (рис.1). Стабілізатор забезпечений системою круглих отворів, через які здійснюється поперечна подача газу в зносячий потік повітря. Отвори розташовуються перед зміщеною вниз за потоком прямокутною кільцевою нішею.

Математична модель досліджуваних процесів течії і сумішоутворення в мікрофакельному циліндричному пальниковому пристрої може бути представлена у вигляді

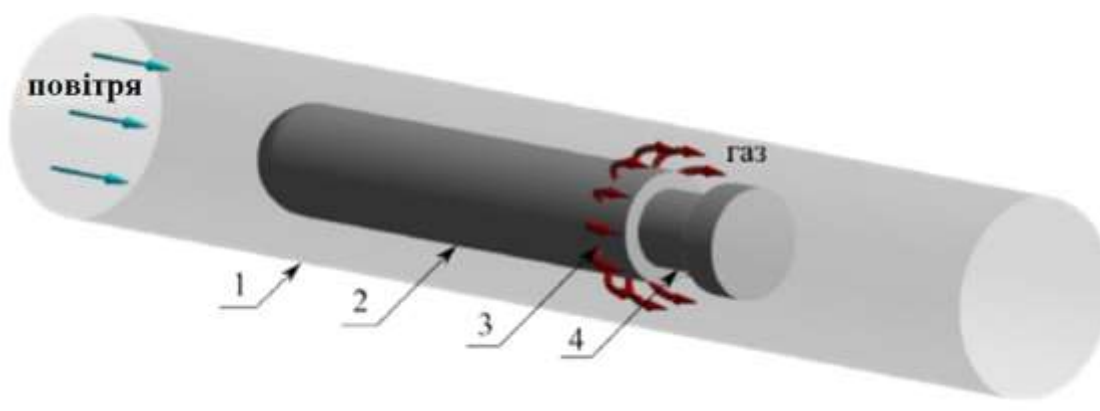
$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}, \quad (1)$$

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

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} Y_i) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu}{Sc_i} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \right), \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

$$\rho = \frac{P}{RT \sum_i \frac{Y_i}{M_i}}, \quad (4)$$

де $\vec{U}$ – вектор швидкості; p – тиск; $\vec{\tau}$ – тензор напружень; ρ – густина; μ , μ_t – коефіцієнти молекулярної і турбулентної динамічної в'язкості; Y_i – масова частка i -го компонента суміші; M_i , D_i , Sc_i – молекулярна маса, коефіцієнт дифузії та число Шмідта i -ої компоненти, $Sc_i = \mu / \rho D_i$; Sc_t – турбулентне число Шмідта; N – кількість компонент суміші; T – абсолютна температура; R – універсальна газова стала.



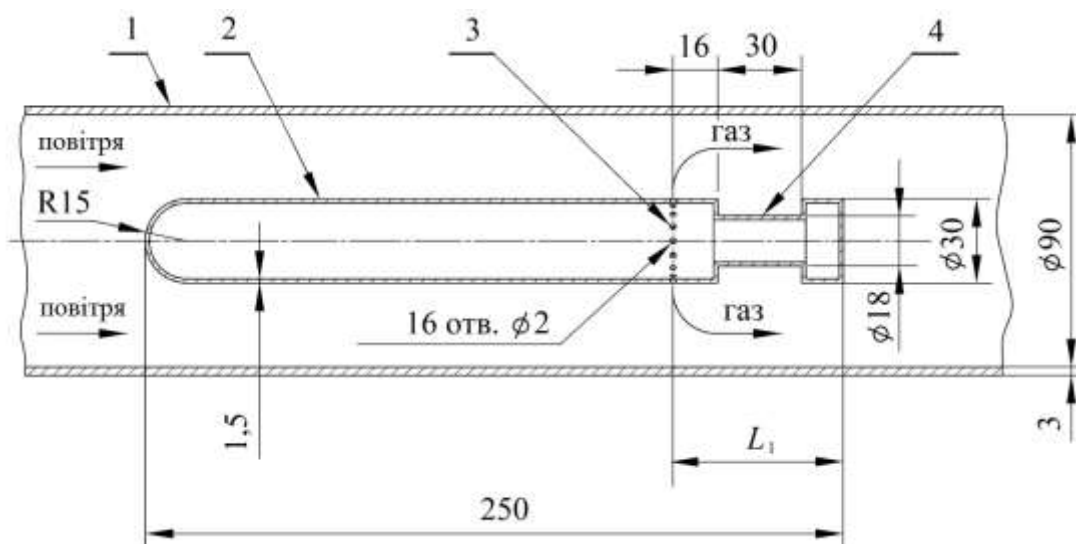


Рис. 1. Схема (а) і поздовжній переріз (б) пальникового пристрою з циліндричним стабілізатором полум'я за наявності кільцевої ніші:

**1 - циліндричний канал; 2 - циліндричний стабілізатор полум'я;
3 - газоподавальні отвори; 4 - кільцева ніша**

Замикання наведеної системи рівнянь здійснюється на основі використання RNG $k-\varepsilon$ моделі турбулентності.

З огляду на регулярність розташування газоподавальних отворів при математичному моделюванні розглядався характерний елемент пальникового пристрою, що представляє собою кутовий фрагмент ($0 < \varphi < \varphi_1$). Тут φ_1 відповідає половині кроку між отворами і включає половину одного з них. У вхідному перерізі виділеного елемента задавалася швидкість повітря, його ступінь турбулентності і температура. У поперечному перерізі газоподавального отвору на бічній стінці стабілізатора заданими є швидкість газу, його ступінь турбулентності і температура.

На інших поверхнях стінок стабілізатора і бічних поверхнях каналу приймалися умови прилипання і непроникності. На поверхнях виділеного елемента $\varphi = 0$ і $\varphi = \varphi_1$ задавалися умови симетрії, у вихідному перерізі –

«м'які» граничні умови, що відповідають рівності нулю похідних по нормалі до границі від залежних змінних.

Чисельна реалізація рішення даної задачі здійснювалася з застосуванням програмного пакету Fluent.

Результати досліджень. Нижче на рис. 2 представлено характерні результати комп'ютерного моделювання процесів переносу в розглядуваних пальникових пристроях з нішами. Наведені дані відповідають пальниковому пристрою потужністю $N_{\text{п}} = 110$ кВт при наступних значеннях вихідних параметрів. Витрата природного газу $G_{\text{г}} = 11$ м³/год; коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,1$; $L_{\text{ст}} = 0,25$ м; $L_1 = 0,062$ м; $L_2 = 0,016$ м; $d_{\text{ст}} = 0,04$ м; $D = 0,073$ м; $d = 0,003$ м; $S/d = 3,22$; розміри прямокутної ніші $L \times H = 0,021 \times 0,006$ м; $h_0 = 0,0015$ м; $h_1 = 0,003$ м; інтенсивність турбулентності повітря на вході в каналі $I_{\text{п}} = 3\%$, природного газу в поперечному перерізі газоподавальних отворів $I_{\text{г}} = 3\%$, абсолютна температура газу і повітря 300 К.

Аналіз наведених результатів досліджень свідчить про те, що інтенсивність турбулентності в пальниках з нішею і за її відсутності може істотно відрізнятися як в якісному, так і в кількісному відношенні (рис. 2).

Як видно з рис. 2, за відсутності нішевої порожнини у перерізах ($z = 209,25 \cdot 10^{-3}$ м; $214,5 \cdot 10^{-3}$ м; $219,75 \cdot 10^{-3}$ м) радіальні розподіли інтенсивності I характеризуються наявністю двох локальних максимумів. Перший з них розташований поблизу стінки каналу пальника і пов'язаний з пристінною турбулентністю, другий, більш яскраво виражений, відповідає осі газового струменя в потоці окиснювача, що зносить. За наявності кільцевої ніші до зазначених максимумів додається ще один, розташований у власне нішовій порожнині та обумовлений наявністю так званого шару змішування.

Згідно з даними, наведеними на рис. 2, наявність ніші помітно впливає на величину I поблизу зовнішньої поверхні стабілізатора $r = 0,02$ м. Цей

вплив зменшується з віддаленням від даної поверхні (зі збільшенням радіуса r), так що на деякій відстані від неї стає практично незначним. Причому чим ближче розташований переріз $z = const$ до вхідної кромки ніші, тим при менших значеннях r ($r = r^*$) стають практично однаковими величини інтенсивності турбулентності для ситуацій, що відповідають наявності і відсутності нішової порожнини. Так, при $z = 209,25 \cdot 10^{-3}$ м (чверть довжини ніші від передньої кромки) величина r^* складає приблизно 0,024 м, а при $z = 0,225$ м (задня стінка ніші) значення $r^* = 0,26$.

Таким чином, в зоні розташування ніші її вплив на інтенсивність турбулентності потоку локалізується на відстані 4-6 мм від зовнішньої поверхні стабілізатора $r = 0,015$ м.

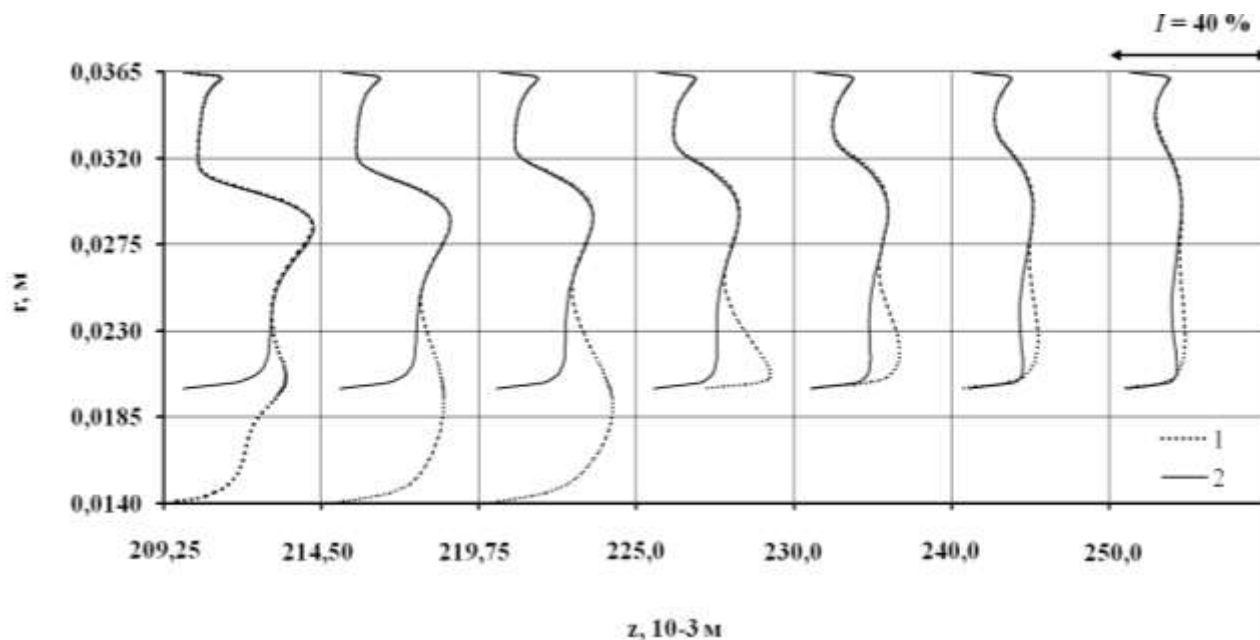


Рис. 2. Розподіл інтенсивності турбулентності по радіусу пальника потужністю $N_{\text{п}} = 110$ кВт за наявності (1) і відсутності (2) кільцевої ніші для $\varphi = 0$ в поперечних перерізах $z = const$: $z = 0,20925$ м (чверть довжини ніші); $z = 0,2145$ м (середина ніші); $z = 0,21975$ м (три чверті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

Вниз за потоком за нішевою порожниною її вплив на величину I охоплює істотно більші області по радіусу каналу (рис. 2). Наприклад, на зривній кромці стабілізатора даний вплив є відчутним на відстані до 14 мм від зовнішньої поверхні стабілізатора.

Що стосується величини відхилень значень інтенсивності турбулентності за наявності і відсутності нішевої порожнини, то вони можуть бути значними. Так, у зовнішньому потоці в перерізі $z = 0,225$ м, що відповідає задній стінці ніші, інтенсивність турбулентності поблизу зовнішньої поверхні стабілізатора майже вдвічі перевищує відповідні значення за відсутності ніші і становить приблизно 34%.

Необхідно також відзначити, що за результатами виконаних досліджень втрати тиску, пов'язані з наявністю кільцевої прямокутної ніші, незначні. А саме, для розглянутих умов у разі відсутності нішевої порожнини втрати тиску ΔP в пальнику складають 61,0 Па, а за наявності ніші – 69,0 Па. Тобто, зазначені втрати збільшуються тільки на 8,0 Па.

Висновки. Виконано дослідження впливу прямокутної кільцевої ніші на параметри течії в циліндричному пальниковому пристрої. Зокрема встановлено, що:

- за наявності ніші інтенсивність турбулентності потоку збільшується, причому в місцях її максимальних значень може перевищувати відповідні величини в випадку відсутності ніші майже в два рази;
- зона найбільшого впливу ніші на турбулізацію потоку локалізується поблизу місця її розташування, що є важливим для займання палива і стабілізації полум'я.

Література

1. Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О, Алешко С.А., Полозенко Н.П. Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха // Промышленная теплотехника. 2011. №1. С. 51-56.
2. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовский Л.С., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О, Полозенко Н.П. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени // Промышленная теплотехника. 2011. №2. С. 59-64.
3. Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Грановская Е.А., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Коханенко П.С. Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком // Промышленная теплотехника. 2010. №5. С. 26-33.
4. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовский Л.С., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Коханенко П.С., Полозенко Н.П. Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени // Промышленная теплотехника. 2010. №6. С. 28-36.
5. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В, Прокопов В.Г., Полозенко Н.П., Меранова Н.О., Алешко С.А., Иваненко Г.В., Юрчук В.Л., Милко Е.И., Ольховская Н.Н. Моделирование структуры течения в эшелонированных решетках стабилизаторов при варьировании шага их смещения // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2015. Т.2, №8(74). С. 29-34.

6. Навродська Р.О., Фіалко Н.М., Гнедаш Г.О., Сбродова Г.О. Енергоефективна теплоутилізаційна система для підігрівання тепломережної води та дуттьового повітря котлів комунальної теплоенергетики // Промышленная теплотехника. 2017. Т.39, №4. С. 61-68.
7. Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А., Глушак О.Ю. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок с глубоким охлаждением дымовых газов // Современная наука исследования, идеи, результаты, технологии. 2014. №2 (15). С.13-17.
8. Фиалко Н.М., Аронов И.З., Навродская Р.А., Пресич Г.А. Эффективность применения конденсационных теплоутилизаторов в системах теплоснабжения // Промышленная теплотехника. 2003. Т.25, №3. С. 36-41.
9. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Meranova N., Sherenkovskii J. Efficiency of the air heater in a heat recovery system at different thermophysical parameters and operational modes of the boiler // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2018. № 6/8 (96). С. 43-48.
10. Фіалко Н.М., Пресіч Г.О., Навродська Р.О., Гнедаш Г.О. Удосконалення комплексної системи утилізації теплоти відхідних газів котлоагрегатів для підігрівання і зволоження дуттьового повітря // Промышленная теплотехника. – 2011. Т.33, №5. С. 88-95.
11. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические свойства полимерных микро-и нанокомпозитов на основе поликарбоната // Промышленная теплотехника. 2015. №2. С. 12-19.

12. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические свойства низкотеплопроводных полимерных нанокомпозитов для элементов энергетического оборудования // Промышленная теплотехника. 2015. №6. С.5-15.
13. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Структурообразование полимерных микро-и нанокомпозитов на основе поликарбоната в процессах их кристаллизации // Промышленная теплотехника. 2015. №3. С.5-15.
14. Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Навродская Р.О. Теплопроводность полимерных микро-и нанокомпозитов на основе полиэтилена при различных методах их получения // Промышленная теплотехника. 2017. Т.39, №4. С. 21-26.
15. Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Влияние типа полимерной матрицы на теплофизические свойства и структурообразование полимерных нанокомпозитов // Технологические системы. 2016. №3(76). С. 49-60.