

УДК 536.24:533

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТЕЧІЇ ЗА ІЗОТЕРМІЧНИХ УМОВ І ГОРІННЯ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКАХ З БАГАТОРЯДНОЮ ПАЛИВОПОДАЧЕЮ

Фіалко Н.М.¹, член-кореспондент НАН України, Кліщ А.В.², Шеренковський Ю.В.³, канд. техн. наук, Меранова Н.О.⁴, канд. техн. наук, Альошко С.О.⁵, канд. техн. наук, Гладков Д.А.⁶

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, e-mail: nmfialko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>,

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, e-mail: j_sher@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7223-8753>,

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: klishch.andrii@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3449-0381>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, e-mail: mnata1956@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1765-7319>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: s_aleshko@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-0430-7144>,

⁶Національний технічний університет «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ, Україна, 03056, e-mail: den2001.tv.com@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-1727-1286>.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.10>

Представлено результати CFD моделювання течії в пальниках з трирядною подачею паливного газу для ізотермічних умов та реагуючих потоків. Для порівнюваних ситуацій виявлено основні відмінності в характері полів швидкості, її пульсацій тощо. Виконано зіставлення характеристик течії в рециркуляційних зонах за стабілізатором полум'я, відповідальних за стабілізацію горіння.

The results of CFD modeling of flow in burners with three-row fuel gas supply for isothermal and reactive flows are presented. For the compared situations, the main differences in the nature of the velocity fields, velocity pulsations, and other characteristics are identified. Flow characteristics in the recirculation zones behind the flame stabilizer, responsible for combustion stabilization, are compared.

Бібл. 15, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, мікрофакельні пальники, спалювання природного газу, структура течії.

d – діаметр газоподавальних отворів;

k_f – коефіцієнт загромодження прохідного перерізу каналу;

L_0 – відстань від входу в канал до стабілізатора полум'я;

L_1 – відстань від газоподавальних отворів до зривної кромки стабілізатора;

L_{st} – довжина стабілізатора;

L_{zrt} – довжина зони зворотних потоків;

N_R – номер ряду (секції) паливоподачі;

S – крок розташування газоподавальних отворів;

U_x – компонента вектору швидкості вздовж осі абсцис;

U_{in}^a – швидкість повітря на вході в канал;

U_x^{max} – максимальне за абсолютною величиною значення швидкості в зоні зворотних потоків;

α_Σ – загальний коефіцієнт надлишку повітря;

CFD – Computation Fluid Dynamic;

DDES - Delayed Detached Eddy Simulation.

Вступ

Потреби розробки нових модифікацій мікрофакельних пальникових пристроїв значною мірою пов'язані з необхідністю їх експлуатації за різних умов. Зокрема, характерні умови застосування таких пальників відповідають ситуації варіювання у певних межах надлишків окиснювача. В рамках даної робо-

ти розглядається нова модифікація мікрофакельних пальників, призначених для експлуатації при вказаних вимогах.

Розроблення технологічних процесів спалювання палива на основі застосування нових модифікацій пальникових пристроїв передбачає виконання комплексних досліджень всіх елементів їх робочих процесів.

Важливе завдання таких досліджень полягає в аналізі закономірностей течії у цих пальниках, оскільки вони значною мірою є визначальними щодо остаточного технологічного результату.

Експериментальні та теоретичні дослідження закономірностей течії в мікрофакельних пальниках зазвичай здійснюються за двоетапною схемою. Перший етап відповідає так званій холодній продувці, тобто умовам ізотермічної течії, другий – ситуації горіння палива. При цьому особлива увага приділяється порівняльному аналізу характеристик течії, визначених на першому і другому етапах. У даній статті наводяться результати такого аналізу для нової модифікації пальників, орієнтованих на застосування при змінних значеннях коефіцієнта надлишку повітря.

Стала світова тенденція у дослідженні спалювання палива полягає у широкому використанні засобів математичного та комп'ютерного моделювання [1-15]. Це зумовлено, насамперед, розробленням досконалих моделей процесів горіння, застосування яких дає можливість отримувати значні масиви інформації стосовно різних характеристик цих процесів. В даній роботі застосування комп'ютерного моделювання як інструмента досліджень слугує виконанню порівняльного аналізу різних характеристик течії в новій модифікації мікрофакельних пальників за ізотермічних умов та при горінні.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Метою роботи є аналіз закономірностей ізотермічної течії та течії за умов горіння у мікрофакельних пальникових пристроїв з багаторядною подачею палива, орієнтованих на експлуатацію при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря ($1,1 \leq \alpha \leq 1,5$). При цьому розглядається ситуація, що відповідає змінній теплопродуктивності відповідного вогнетехнічного об'єкта.

Щодо конструкції пальникових пристроїв, які розглядаються, то вона базується на модульному принципі. Це дозволяє забезпечувати необхідну потужність таких пристроїв за допомогою набору певної кількості пальникових модулів. Окремий модуль включає стабілізатор полум'я із міжстабілізаторними зонами, що відносяться до нього. І оскільки процеси переносу в окремому модулі та модулі, що входить до системи модулів, є практично ідентичними, то при моделюванні доцільно обмежитися розглядом одиничного пальникового модуля. Модуль пальника складається з плоского стабілізатора полум'я 2, розташованого в каналі 1 на деякій відстані від стінок каналу (рис. 1). Підведення палива до стабілізатора полум'я здійснюється через одну із трьох, відокремлених одна від одної, секцій I, II, III. Кожна із зазначених секцій відповідає подачі паливного газу за певного значення коефіцієнта надлишку повітря з вказаного діапазону. На бічних поверхнях стабілізаторів

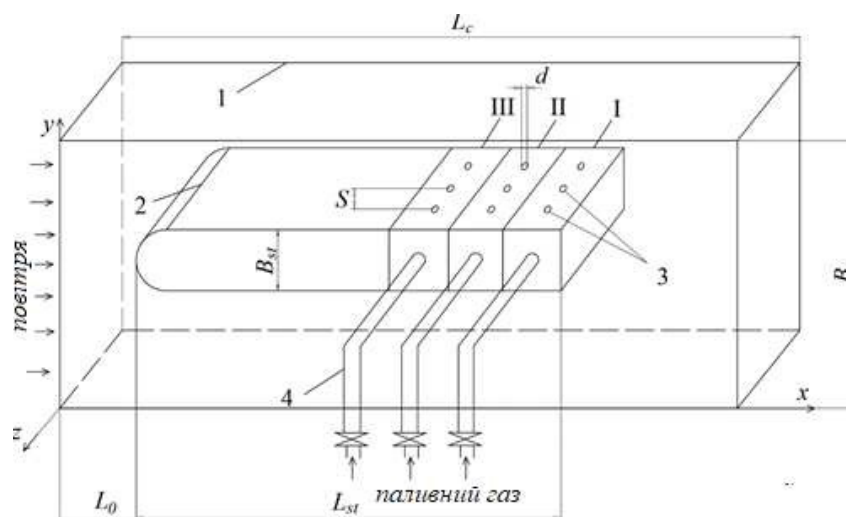


Рис. 1. Схема модуля мікрофакельного пальника стабілізаторного типу з трирядною системою подачі палива: 1 – плоский канал; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; 4 – газопідвідні патрубки;

I, II, III – секції паливоподачі, що відповідають значенням коефіцієнта надлишку повітря 1,1; 1,3; 1,5

Fig. 1. Schematic diagram of the stabilizer-type microjet burner module with a three-row fuel supply system:

1 - flat channel; 2 - flame stabilizer; 3 - gas supply holes; 4 - gas supply pipes; I, II, III - fuel supply sections

corresponding to the values of the excess air coefficient of 1.1; 1.3; 1.5

полум'я розташована трирядна система круглих отворів 3, через які газ подається безпосередньо на горіння в зносячий потік окиснювача.

Математична модель досліджуваного процесу наводиться в [15]. Для розв'язування задачі застосовувався програмний комплекс FLUENT. Комп'ютерне моделювання здійснювалося з використанням DDES підходу. При цьому як базова використовувалася Realizable k-ε модель турбулентності.

Дискретизація розрахункової області здійснювалася неструктурованими нерівномірними сітками при кількості комірок близько чотирьох мільйонів, з детальним розрізненням пристіночної зони (з мінімальним розміром пристіночної комірки $5 \cdot 10^{-5}$ м). В області активного горіння розмір комірки становив $4 \cdot 10^{-4}$ м. Часовий крок при розв'язуванні задач змінювався в межах $(1-5) \cdot 10^{-5}$ с.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз характеристик ізотермічної і неізотермічної течії в зоні рециркуляції за стабілізатором полум'я

Table 1. Comparative analysis of isothermal and non-isothermal flow characteristics in the recirculation zone through a flame stabilizer

N_R	α_Σ	Ізотермічна течія		Неізотермічна течія	
		$L_{zzl}, 10^{-3} \cdot \text{м}$	$U_x^{max}, \text{м/с}$	$L_{zzl}, 10^{-3} \cdot \text{м}$	$U_x^{max}, \text{м/с}$
1	1,1	37,4	6,7	70,2	4,6
2	1,3	35,9	6,5	73,0	4,6
3	1,5	67,3	5,8	103,0	4,2

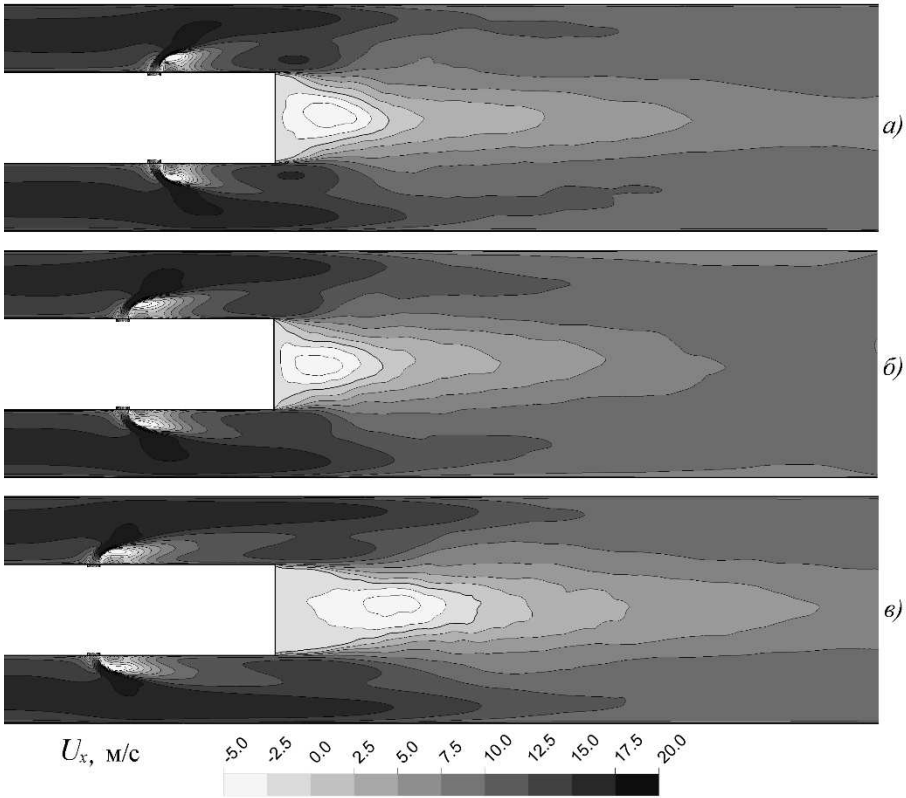


Рис. 2. Поле швидкості U_x у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію за ізотермічних умов

Fig. 2. The velocity field U_x in the longitudinal section of the flame stabilizer passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (a), second (b) and third (c) sections under isothermal conditions

Результати досліджень та їх аналіз

Характерні результати комп'ютерного моделювання ізоатермічної та неізоатермічної течії в пропонуваніх пальникових пристроях ілюструють рис. 2-5 і табл. 1. Наведені результати відповідають таким вихідним даним: $B_{st}=0,03$ м; $B_c=0,075$ м; $L_c=1,3$ м; $L_0=0,1$ м; $L_{st}=0,2$ м; коефіцієнт загромождження прохідного перерізу каналу $k_f=0,4$ ($k_f=B_{st}/B_c$). Значення загального коефіцієнта надлишку повітря α_Σ , відстань L_l між зривною кромкою стабілізатора і відповідними газоподавальними отворами, діаметр отворів та відносний крок їх розташування S/d наведено в таблиці 2. На вході в канал швидкість повітря $U_{in}^a = 10$ м/с, а інтенсивність турбулентності $Tu=3$ %. Як паливо використовувався природний газ, як окиснювач – повітря.

Табл. 2. Конструктивні параметри системи трирядної струменевої подачі палива

Table 2. Design parameters of the three-row jet fuel supply system

N_R	α_Σ	$L_l, 10^{-3}\cdot\text{м}$	$d, 10^{-3}\cdot\text{м}$	S/d
1	1,1	40	3,8	4,21
2	1,3	55	3,5	4,57
3	1,5	70	3,3	4,85

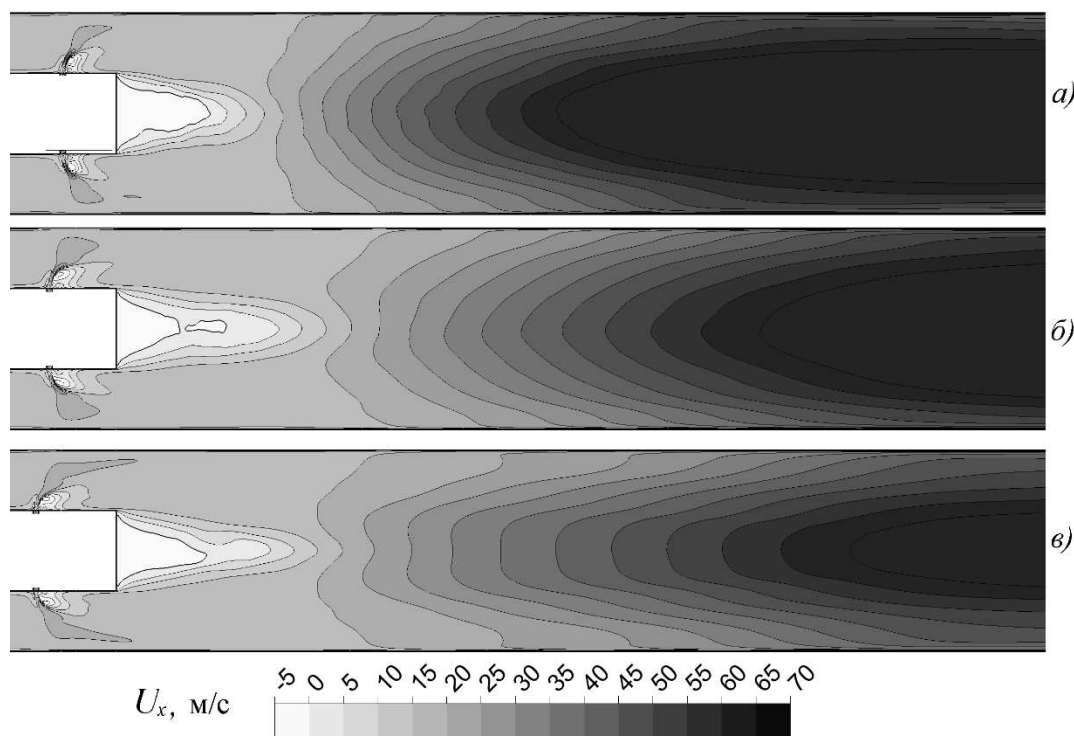


Рис. 3. Поле швидкості U_x у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію за умов горіння

Fig. 3. Velocity field U_x in the longitudinal section of the flame stabilizer passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (a), second (b) and third (c) sections during combustion

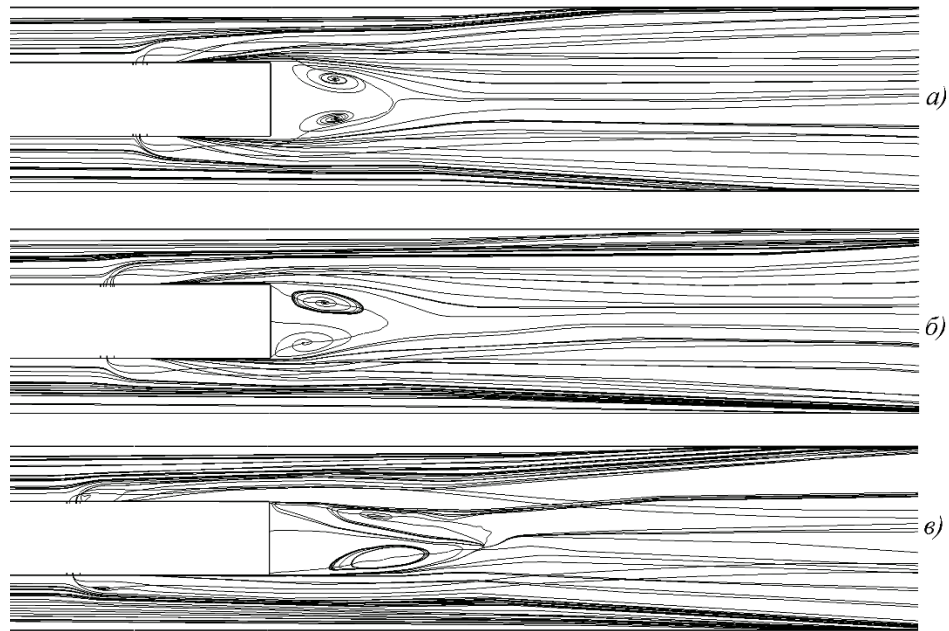


Рис. 4. Картина ліній току у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію за ізотермічних умов
Fig. 4. The flow line pattern in the longitudinal section of the flame stabilizer passing through the axis of the gas supply holes when fuel is supplied to the first (a), second (b) and third (c) sections under isothermal conditions

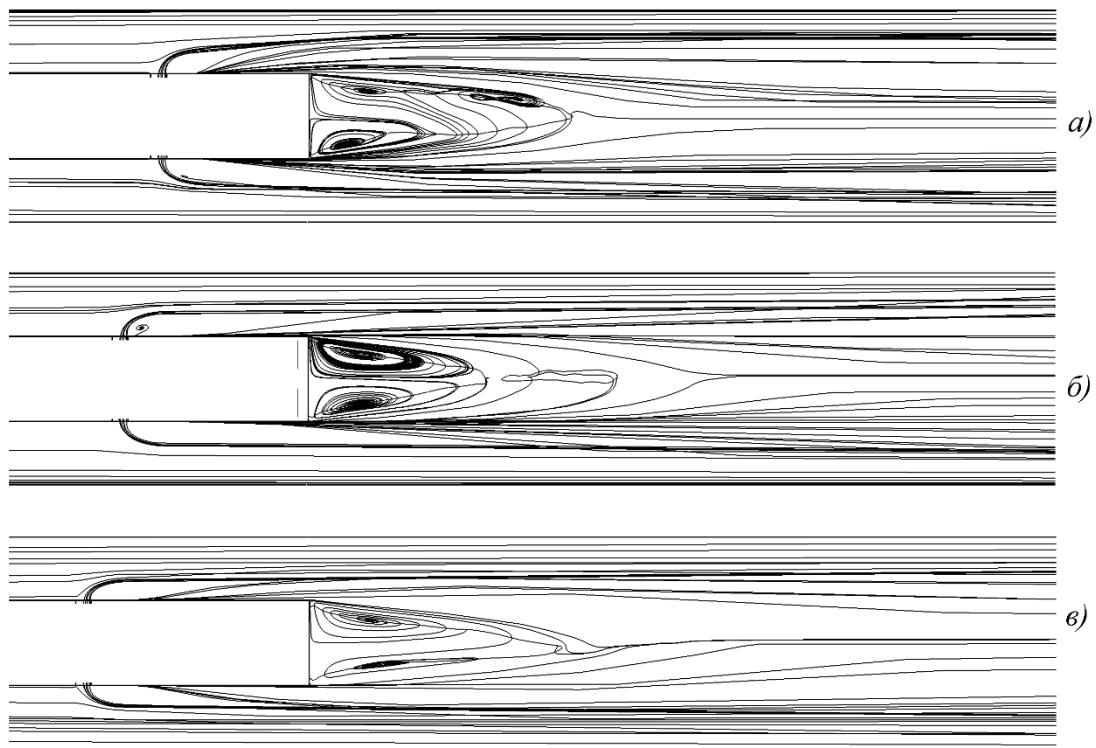


Рис. 5. Картина ліній току у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію за умов горіння
Fig. 5. Picture of flow lines in the longitudinal section of the flame stabilizer passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (a), second (b) and third (c) sections during combustion

В ситуації неізотермічної течії за зоною рециркуляції в закормовій підобласті стабілізатора має місце область підвищених швидкостей, яка розширюється з віддаленням від зривної кромки стабілізатора з огляду на збільшення об'єму газу внаслідок горіння. Прискорення потоку, зумовлене горінням, починається тим нижче за течією, чим далі від зривної кромки розташовані газоподавальні отвори. Як і у випадку ізотермічної течії в області, розташованій на деякій відстані від торця стабілізатора, найвища швидкість відповідає першій секції паливоподачі, а найнижча – третій.

Як свідчать дані, наведені на рис. 2, 3, значення швидкості за стабілізатором полум'я є в цілому суттєво вищими за умов горіння. Так, максимальні швидкості на віддаленні від стабілізатора для третього ряду паливоподачі при ізотермічній течії становлять 11,1 м/с і досягають 18 м/с для реагуючих потоків.

Щодо зони рециркуляції за стабілізатором полум'я, відповідальної за стабілізацію горіння, то характеристики течії в ній також суттєво відрізняються за ізотермічних умов і при горінні.

В таблиці 2 представлено результати комп'ютерного моделювання щодо визначення протяжності цих зон L_{zst} та максимальних за абсолютною величиною значень швидкості в них U_x^{max} . Як видно, при паливоподачі в різні секції протяжності даних зон виявляються суттєво більшими за неізотермічних умов. При цьому для порівнюваних ситуацій в цілому подібним є характер зміни довжини зони рециркуляції L_{zst} зі збільшенням номеру секції паливоподачі. А саме, при подачі паливного газу в першу і другу секції величини L_{zst} змінюються несуттєво. Однак, має місце її різке збільшення за умов паливоподачі в третю секцію.

Стосовно значень максимальної за абсолютною величиною швидкості U_x^{max} в зонах рециркуляції, то для всіх секцій паливоподачі вони дещо нижчі при горінні.

Для порівнюваних ситуацій значні відмінності має також картина середньоквадратичних пульсацій швидкості. Так, за ізотермічних умов підобласті високих пульсацій швидкості розташовуються в зонах рециркуляції за стабілізатором, дещо зміщуючись вниз за потоком зі збільшенням номера секції паливоподачі. При горінні зони високих пульсацій значно віддалені від торця стабілізатора. Ця віддаленість тим більша, чим далі від зривної кромки розташовані газоподавальні отвори. В цілому при горінні рівень пульсацій швидкості на віддаленні від стабілізатора значно перевищує відповідний рівень за ізотермічних умов. Так, середньоквадратичні пульсації швидкості при

паливоподачі у третю секцію досягають 7,0 м/с за умов реагуючих потоків і лише 0,5 м/с – при ізотермічній течії.

Висновки

1. Виконано комплекс розрахункових досліджень течії за ізотермічних умов та при горінні в пальникових пристроях з багаторядною системою подачі паливного газу, орієнтованих на експлуатацію при змінних значеннях коефіцієнта надлишку повітря ($1,1 \leq \alpha \leq 1,5$).

2. За результатами CFD моделювання показано, що картина ізотермічної і неізотермічної течії в пропонуваніх пальниках суттєво відрізняється в якісному і кількісному відношенні.

3. Виконано порівняльний аналіз характеристик зон рециркуляції за стабілізатором полум'я для реагуючих потоків та ізотермічних умов. Встановлено, що при горінні довжина зон рециркуляції помітно збільшується, а максимальні за абсолютною величиною швидкості в цих зонах зменшуються.

4. Виявлено основні відмінності в характері полів середньоквадратичних пульсацій швидкості в досліджуваних пальниках за ізотермічних і неізотермічних умов.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Мєранова Н.О., Рокитько К.В. Структура течії в пальникових пристроях з асиметричним паливорозподіленням для реагуючих потоків та ізотермічних умов. Теплофізика та теплоенергетика. 2020, т. 42(1), №1, С.19-26. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.2>
2. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Milko E.I., Maletskaya O.E., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Donchak M.I., Regragui A., Donchak M.I. Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. Технологические системы, 2018. 3(38). С. 37-43.
3. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Аleshko С.О., Мєранова Н.О., Прокопов В.Г., Тимошенко О.Б., Полозенко Н.П., Стрижеус С.Н. 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.
4. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимошенко О.Б., Сірий О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Кліщ А.В., Озеров А.А., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я. Температурні режими зон зворотних потоків у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. Науковий вісник НЛТУ, 2018, 28, №3. С.97-100.

5. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовський Л.С., Шеренковський Ю.В., Аleshko С.О., Меранова Н.О., Полозенко Н.П. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени. Промышленная теплотехника. 2011. №2. С. 59-64
6. Uwe Schnell. Numerical modelling of solid fuel combustion processes using advanced CFD-based simulation tools. International Journal of Progress in Computational Fluid Dynamics, , 2001, Vol. 1, No. 4. pp 208-218 <https://doi.org/10.1504/PCFD.2001.001485>
7. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Абдулин М.З., Алёшко С.А. Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Миргородський А.Н. Компьютерное моделирование процессов переноса в системах охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа. Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 64-71.. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/59056>
8. Фіалко Н.М. , Аleshko С.А., Абдулин М.З., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Тимощенко А.Б., Бутовський Л.С. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа. Технологические системы. 2012. 58/1. С.52-57.
9. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О. Аеродинаміка і сумішоутворення в пальниках з багаторядною струменевою системою паливоподачі. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. №2. С. 34-44. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.4>
10. Perpignan, A.A.V., Talboom, M. G., Levy Y, and Gangoli Rao, A. (2018) Emission Modeling of an Interturbine Burner Based on Flameless Combustion. Energy Fuels, 32, 822–838. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02473>
11. Кобзар С.Г., Топал О.І., Гапонич Л.С., Голенко І.Л., Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів // Електронне моделювання, 2020, Т. 42, №6, с. 74–92. URL: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>
12. Fialko N., Meranova N., Shrenkovskii Ju., Aleshko S., Rokytko K Flow structure in a stabilizer burner with one-sided fuel supply. International Multidisciplinary Conference Science and technology of the presents time: priority development directions of Ukraine and Poland. Volomin. 19-20 October. 2018 P. 112-115 ISBN 978-9934-571-55-8.
13. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Хміль Д.П., Меранова Н.О., Альошко С.О., Полозенко Н.П., Кліщ А.В., Чехаровська М.І., Дашковська І.Л., Попружук І.О. Ефекти впливу номеру ряду струменевої подачі палива на характеристики течії і сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2023. №6(140). С. 65-70. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-6-8767>
14. Zimont V. L., Biagioli F., Syed K. Modelling turbulent premixed combustion in the intermediate steady propagation regime. International Journal of Progress in Computational Fluid Dynamics. 2001. Vol. 1, No. 1-3 Published Online: August 29, 2007 pp 14-28 <https://doi.org/10.1504/PCFD.2001.001467>
15. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Прокопов В.Г., Альошко С.О., Меранова Н.О., Рокитько К.В. CFD моделювання температурних режимів зони горіння пальників стабілізаторного типу з асиметричною подачею палива. Теплофізика та теплотехніка. 2019. 41. №4. С.13-18. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019>

COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOW PATTERNS UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS AND COMBUSTION IN MICRO-JET BURNERS WITH MULTI-ROW FUEL SUPPLY

Fialko N.M.¹, Klishch A.², Sherenkovskii Ju.³, Meranova N.⁴, Aleshko S.⁵, Gladkov D.⁶

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Junior Researcher, orcid.org/0009-0001-3449-0381, e-mail: klishch.andrii@gmail.com

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7223-8753, e-mail: j_sher@ukr.net

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0003-1765-7319, e-mail: mnata1956@ukr.net

⁵PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s_aleshko@ukr.net

⁶National Technical University of Ukraine, "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"», av. Beresteisky, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, orcid.org/0009-0000-1727-1286, e-mail: den2001.tv.com@gmail.com,

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.10>

The article presents the results of a comparative analysis of isothermal and nonisothermal flow characteristics in stabilizer-type burners with three-row fuel feed, designed for operation at variable excess air ratios. CFD modeling using the FLUENT software package was used as the research method. Simulation experiments were performed using the DDES approach with the Realizable k- ϵ turbulence model. The modeling results revealed significant differences in the flow patterns for the compared situations. These differences include, in particular, the location of high-velocity zones in different regions of the channel. It is shown that the velocity

behind the flame stabilizers is generally significantly higher during combustion due to flow acceleration caused by thermal expansion of the gases. This acceleration is found to begin downstream, the farther the gas supply openings are from the stall edge. Particular attention is paid to comparing the characteristics of recirculation zones in the aft region of flame stabilizers, which are responsible for stabilizing the combustion process, for isothermal and nonisothermal flow conditions. It is shown that the extent of these zones increases during combustion, while the maximum absolute velocity values within them decrease. Results are also presented for comparing velocity pulsation fields in the burner devices under study for reacting flows and isothermal flow. It is established that the level of these pulsations during combustion generally significantly exceeds the corresponding level for isothermal flow. The results of these studies can be widely used in selecting the design and operating parameters of the proposed burners.

References 15, table 2, figures 5.

Key words: computer modeling, microjet burners, natural gas combustion, flow structure.

1. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju.V., Aleshko S.A., Meranova N.A., Rokitko K.V. Flow structure in burner devices with asymmetric fuel distribution for reacting flows and isothermal conditions. *Thermophysics and Thermal Power Engineering* 2020, V. 42(1), №1, P.19-26. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.2>. (in Ukr.)

2. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Milko E.I., Maletskaya O.E., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Regragui A., Donchak M.I. Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. *Technological systems*, 2018. 3(38). P. 37-43. (in rus.)

3. Fialko N.M., Sherenkovskii Ju.V., Prokopov V.G., Meranova N.O., Aleshko S.O., Timoschenko O.B., Polozenko N.P., Strizheus S.N. Comparative analysis of flow characteristics in burners with echelon arrangement of flame stabilizers under isothermal conditions and during fuel combustion. *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2016. Issue 242. P. 33-40. (in rus.)

4. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Timoshchenko O. B., Siriy O.A., Sherenkovskii Ju.V., Milko E.I., Ozerov A.A., Klich A.V., Olkhovskaya N.M., Shvetsova L.Ya. Temperature regimes of the turning current zone in the near slide of cylindrical stabilizers of the semiconductor field. *Scientific Bulletin of NLTU*, 2018, 28, No. 3. P. 97-100. (in Ukr.)

5. Fialko N.M., Prokopov V.G., Butovsky L.S., Sherenkovskii Ju.V., Aleshko S.O., Meranova N.O., Polozenko N.P. Features of the flow of fuel and oxidizer with an echeloned arrangement of flame stabilizers. *Industrial Heat Engineering*. 2011. No. 2. P. 59-64. (in rus.)

6. Uwe Schnell. Numerical modelling of solid fuel combustion processes using advanced CFD-based simulation tools. International Journal of Progress in Computational Fluid Dynamics, 2001, Vol. 1, No. 4. pp 208-218 <https://doi.org/10.1504/PCFD.2001.001485>
7. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju.V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Abdulin M.Z., Butovsky L.S., Mirgorodskiy A.N. Computer modeling of transfer processes in cooling systems of stabilizer-type burner devices. Industrial heat engineering. 2012. No.1. P. 64-71. <https://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/59056> (in rus.)
8. Fialko N.M., Aleshko S.A., Sherenkovskii Ju.V., Meranova N.O., Timoshchenko A.B., Abdulin M.Z., Butovsky L.S. Efficiency of cooling systems of jet-stabilizer-type burner devices. Technological systems. 2012. 58/1. P.52-57. (in rus.)
9. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A. Aerodynamics and mixture formation in burners with a multi-row jet fuel supply system. Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2023. No. 2. P. 34-44. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.4> (in Ukr.)
10. Perpignan, A.A.V., Talboom, M. G., Levy Y., and Gangoli Rao, A. (2018) Emission Modeling of an Interturbine Burner Based on Flameless Combustion. Energy Fuels, 32, P.822–838. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02473>
11. Kobzar S.G., Topal O.I., Gaponich L.S., Golenko I.L. Modeling the process of co-combustion of natural gas with fuels from municipal solid waste // Electronic Modeling, 2020, Vol. 42, No. 6, P. 74-92. URL: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072> (in Ukr.)
12. Fialko N., Meranova N., Shrenkovskii Ju., Aleshko S., Rokytko K., Flow structure in a stabilizer burner with one-sided fuel supply. International Multidisciplinary Conference Science and technology of the presents time: priority development directions of Ukraine and Poland. Volomin. 19-20 October. 2018 P. 112-115 ISBN 978-9934-571-55-8.
13. Fialko N.M., Sherenkovskii Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Chekharovskaya M.I., Dashkovskaya I.L., Khmel D.P., Kleshch A.V., Popruzhuik I.A. Effects of the fuel jet feed row number on the flow and mixture formation characteristics in microtorch burners. International Scientific Journal "Internauka". 2023. No. 6 (140). P. 65-70. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-6-8767> (in Ukr.)
14. Zimont V. L., Biagioli F., Syed K. Modelling turbulent premixed combustion in the intermediate steady propagation regime. International Journal of Progress in Computational Fluid Dynamics. 2001. Vol. 1, No. 1-3 Published Online: August 29, 2007. P 14-28 <https://doi.org/10.1504/PCFD.2001.001467>
15. Fialko N.M., Sherenkovskii Ju.V., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Meranova N.A., Rokytko K.V. CFD modeling of temperature regimes of the combustion zone of stabilizer-type burners with asymmetric fuel supply. Thermophysics and Heat Engineering. 2019. 41. No. 4. P. 13-18. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019> (in Ukr.)

Отримано 27.09.2025

Received 27.09.2025

Прийнято до друку 04.11.2025

Accepted for publication 04.11.2025