

УДК 621.036.7

СТРУКТУРА ТЕЧІЇ ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ПАЛЬНИКАХ З ТРИРЯДНОЮ СИСТЕМОЮ ПАЛИВОПОДАЧІ

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

⁶Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, мол. наук. співр, e-mail: martiuk.o76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.8>

Наведено результати комп'ютерного моделювання неізотермічної течії в мікрофакельних пальниках з трирядною подачею паливного газу, призначених для експлуатації за умов різних значень коефіцієнта надлишку повітря. Представлено дані щодо впливу ряду паливоподачі на аеродинаміку пропонованих пальників.

The results of computer modeling of non-isothermal flow in micro-jet burners with three-row fuel gas supply intended for operation at different values of the excess air coefficient are presented. Data on the influence of the fuel supply row on the aerodynamics of the proposed burners are presented.

Бібл. 30, рис. 5, табл. 1.

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

L_i – відстань між зривною кромкою стабілізатора і віссю газоподавальних отворів;
 N_R – номер ряду (секції) паливоподачі;
 U_x – компонента вектору швидкості вздовж осі абсцис;

U_{mag} – середньоквадратичні пульсації швидкості;
 α_Σ – загальний коефіцієнт надлишку повітря;
CFD – Computation Fluid Dynamic;
DES – Detached Eddy Simulation.

Вступ

Вимоги підвищення ефективності пальникових пристроїв потребують глибокого вивчення їх робочих процесів [1-9]. При цьому дослідження таких процесів, як правило, базується на застосуванні підходу, згідно якого робочий процес підготовки і спалювання палива в цілому поділяється на окремі елементарні процеси. До цих елементарних процесів належать, насамперед, течія і сумішоутворення палива і окиснювача, запалювання і стабілізація полум'я та вигорання палива. Вказаний поділ на елементарні процеси має велике методичне значення, хоча ці процеси є значною мірою взаємопов'язаними і взаємозалежними.

Серед елементарних процесів спалювання палива на особливу увагу заслуговує аеродинаміка паливного

пристрою [6-17]. Це зумовлено тим, що структура течії в пальнику значною мірою визначає ефективність спалювання в цілому і остаточний технологічний результат. Згідно з наявною практикою дослідження аеродинаміки пальникового пристрою вивчається в два етапи. Перший з них є попереднім і відповідає умовам ізотермічної течії [6-25]. На другому етапі розглядається структура течії за умов реагуючих потоків [26-30].

Мета роботи

Мета роботи полягає у встановленні за даними CFD моделювання закономірностей течії реагуючих потоків в мікрофакельному пальниковому пристрої з трирядною системою паливоподачі, призначеному для експлуатації за умов різних значень коефіцієнта надлишку повітря.

Методика проведення досліджень

Розглядаються процеси неізотермічної течії в пальнику, орієнтованому на експлуатацію при змінних значеннях коефіцієнта надлишку повітря, $1,1 \leq \alpha \leq 1,5$. Дослідженню підлягає ситуація, що відповідає наявності одного паливного модуля в каналі.

Схема модуля досліджуваного пальника наведена на рис.1. Стабілізатор полум'я 2 розташовується в каналі 1. Через одну з трьох секцій I, II, III подається паливний газ при значенні коефіцієнта надлишку повітря 1,1; 1,3; 1,5 відповідно.

Математична модель досліджуваного процесу має такий вигляд.

Рівняння руху

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j}, \quad i=1,2,3. \quad (1)$$

В рівнянні (1) і в подальших співвідношеннях мається на увазі підсумовування за повторюваним індексом.

Рівняння суцільності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0. \quad (2)$$

Рівняння енергії для реагуючих турбулентних потоків, представлене у формі рівняння переносу ентальпії h

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial(\rho U_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_r}{Pr_r} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + q_h \quad (3)$$

Рівняння збереження маси компонентів реагуючої суміші

$$\frac{\partial \rho_K}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_K U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Sc_K} + \frac{\nu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial \rho_K}{\partial x_j} + R_K, \quad (4)$$

$$K = 1, 2, \dots, N-1,$$

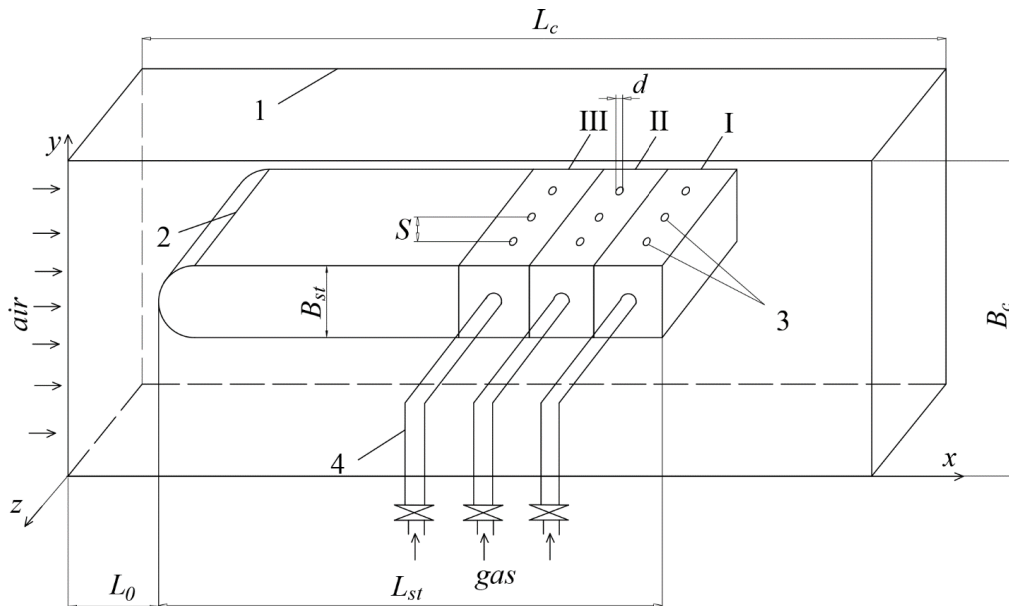


Рис. 1. Схема модуля мікрофакельного пальника стабілізаторного типу з трирядною системою подачі палива: 1 – плоский канал; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; 4 – газопідвідні патрубки;

I, II, III – секції паливоподачі з різними значеннями відносного кроку розташування газоподавальних отворів, 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 with different values of the relative step of the gas supply holes, corresponding to the values of the excess air coefficient of 1.1; 1.3; 1.5

де ρ – густина середовища; t – час; x_j – декартова координата, $j=1,2,3$; U_j – компоненти вектору швидкості у напрямку x_j ; P – статичний тиск; τ_{ij} – компоненти тензора напружень,

$$\tau_{ij} = 2(\mu + \mu_T)S_{ij} - \frac{2}{3}\left[(\mu + \mu_T)\frac{\partial U_n}{\partial x_n} + \rho \cdot k\right]\delta_{ij},$$

k – кінетична енергія турбулентних пульсацій, μ, μ_T – молекулярна і турбулентна динамічна в'язкість, δ_{ij} – символ Кронекера;

S_{ij} – компоненти тензора швидкостей деформацій, $S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$ Pr – число Прандтля,

$Pr = \frac{\nu}{a}$, a, ν – температуропровідність і кінематична в'язкість відповідно; Pr_T – турбулентне число Прандтля; q_h – член, що враховує теплоту хімічних реакцій і перенесення теплоти радіацією; ρ_K – парціальна масо-

ва густина K -го компонента, $\rho_K = \rho \cdot w_K$, w_K – масова концентрація K -го компонента; N – число компонентів суміші; Sc_K – число Шмідта K -го компонента, $Sc_K = \frac{\nu}{D_K}$,

D_K, R_K – коефіцієнт дифузії і швидкість утворення K -го компонента; ν_T – турбулентна кінематична в'язкість; Sc_T – турбулентне число Шмідта.

Граничні умови для системи диференціальних рівнянь (1) – (4) визначалися таким чином. У вхідному перетині задавалися постійні значення відповідних величин (швидкостей, концентрацій, температур). У вихідному перетині каналу пальникового пристрою приймалися м'які граничні умови. На твердих границях пальникового пристрою задавалися умови прилипання для швидкостей і рівності нулю перших похідних по нормалі до цих границь від концентрацій компонент суміші. Як теплові умови на бічній поверхні каналу приймалися умови водяного охолодження його стінок. Розв'язування наведеної системи рівнянь здійснювалось на основі застосування DES підходу.

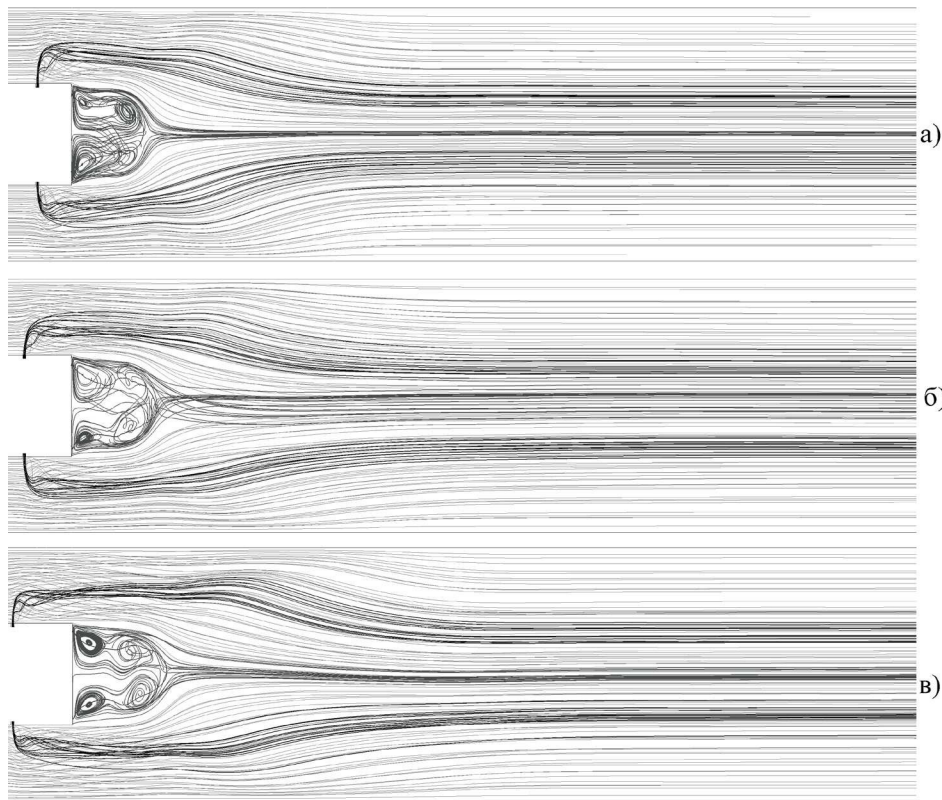


Рис. 2. Картина ліній току у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію

Fig. 2. 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

Результати досліджень та їх аналіз

Характерні результати виконаних досліджень наведено на рис. 2-5. Представлені дані відповідають таким вихідним параметрам: $B_{st}=0,03$ м; $B_c=0,075$ м; $L_c=1,3$ м; $L_0=0,1$ м; $L_{st}=0,2$ м; коефіцієнт загромодження прохідного перерізу каналу $k_f=0,4$ ($k_f=B_{st}/B_c$). Значення загального коефіцієнта надлишку повітря α_Σ , відстань L_1 між зривною кромкою стабілізатора і відповідними газоподавальними отворами, відносний крок розташування газоподавальних отворів S/d та швидкість повітря на вході канал U_{in}^a для подачі палива у різні секції наведено в таблиці 1. Інтенсивність турбулентності Tu у

вхідному перерізі каналу $Tu=3$ %. Як паливо використовувався природний газ, як окиснювач – повітря. Умови експлуатації пальникового пристрою відповідають його постійній теплопродуктивності.

Результати досліджень свідчать, що структура неізотермічної течії при подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів має певні загальні закономірності. Останні стосуються розвитку паливних струменів у зносячому потоці окисника, утворення зон рециркуляції в заковмій області стабілізатора тощо. Однак характеристики течії можуть помітно відрізнятися при подачі паливного газу через перший,

Табл. 1. Конструктивні параметри системи трирядної струменевої подачі палива та значення швидкості на вході в канал

Table 1. Design parameters of the three-row jet fuel supply system and the value of the velocity at the channel inlet

N_R	α_Σ	$L1, 10^{-3}\cdot\text{м}$	$d, 10^{-3}\cdot\text{м}$	S/d	$U_{in}^a, \text{м/с}$
1	1,1	40	3,8	4,21	5,00
2	1,3	55	3,5	4,57	5,91
3	1,5	70	3,3	4,85	6,82

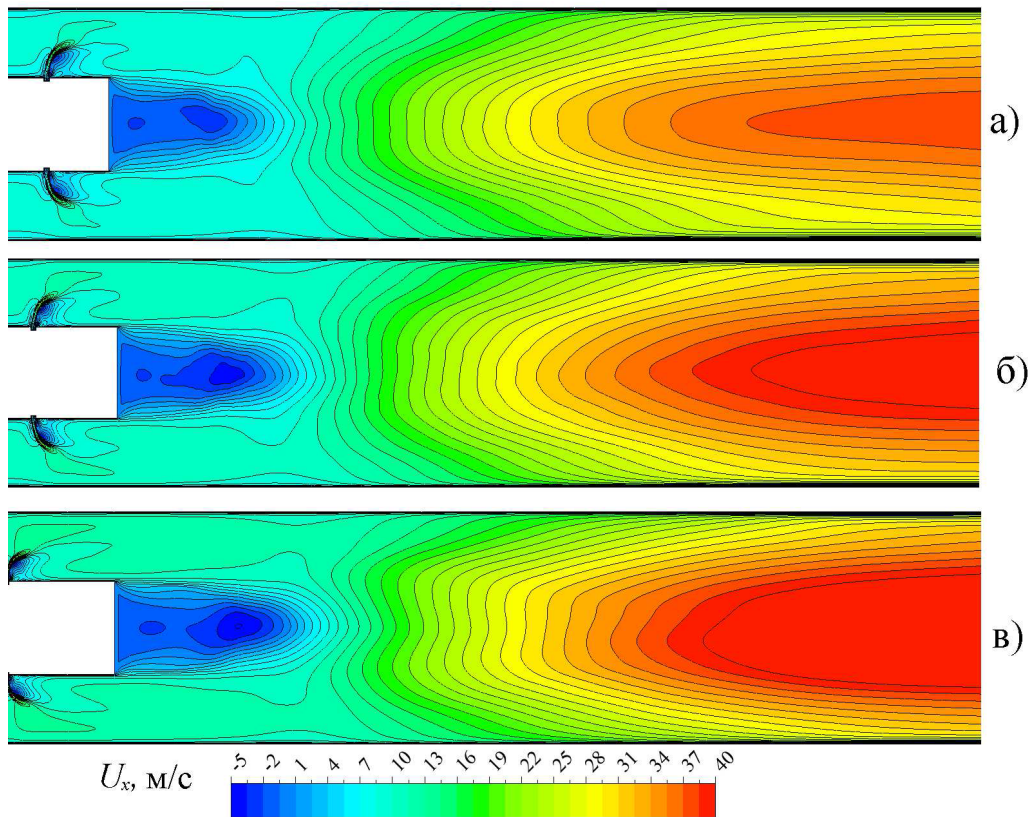


Рис. 3. Поле швидкості U_x у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію

Fig. 3. 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

другий і третій ряд газоподавальних отворів. Так, згідно з даними комп'ютерного моделювання зі збільшенням номера ряду паливоподачі N_R протяжність зони рециркуляції в закововій області стабілізатора зростає відповідно від 88 мм до 98 мм і далі до 107 мм. Зростає також максимальне по модулю значення швидкості в цій зоні і становить 3,9 м/с; 4,6 м/с та 5,1 м/с при подачі палива у першу, другу і третю секцію.

Як свідчать дані на рис. 3, помітними є також відмінності картини полів швидкості $U_x = f(x)$ за умов паливоподачі у різні секції. (На рисунку темні зони за стабілізатором полум'я відповідають від'ємним та низьким значенням швидкості, а затемнені зони біля вихідного перерізу каналу – її високим значенням). А саме, чим більше номер N_R секції подачі паливного газу, тим в цілому вищим є рівень швидкості потоку. При цьому ширина області підвищених швидкостей поблизу виходу з каналу збільшується з ростом номеру секції.

Картину зміни швидкості U_x вздовж осі стабілізатора полум'я для умов подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів ілюструє рис. 4. Як видно, взаємне розташування кривих $U_x = f(x)$ для різних секцій паливоподачі змінюється вздовж даної осі. Так, в закововій області стабілізатора найбільша швидкість відповідає першій секції паливоподачі, а найменша третій. З віддаленням від задньої стінки стабілізатора відбувається інверсія вказаного взаємного розташуван-

ня кривих U_x . При цьому в першій із зазначених областей відмінності у величинах швидкостей U_x для різних секцій подачі паливного газу є відносно невеликими. Вони поступово зростають у вказаній зоні інверсії, і на певній відстані від торця стабілізатора полум'я досягають значень, які несуттєво змінюються за потоком.

На рисунку 5 наводяться поля середньоквадратичних пульсацій швидкості U_{mag}' при подачі паливного газу у різні ряди газоподавальних отворів.

Як свідчать представлені дані найвищий в цілому рівень пульсацій швидкості U_{mag}' спостерігається при подачі паливного газу у другу секцію паливоподачі, нижчий – у першу секцію і найнижчий – в третю секцію. Тобто залежність вказаного рівня пульсацій від номеру секції паливоподачі є немонотонною. Це пояснюється дією низки конкуруючих факторів. Зокрема, підвищення швидкості потоку окиснювача з ростом коефіцієнта надлишку повітря і відповідно номера ряду з одного боку може сприяти підвищенню рівня пульсацій швидкості, а з другого – його зменшенню з огляду на зниження інтенсивності горіння.

Висновки

1. На основі CFD моделювання одержано дані щодо закономірностей течії реагуючих потоків в мікрофакельних пальниках стабілізаторного типу, призначених для експлуатації при змінних значеннях коефіцієнта надлишку повітря (1,1 ... 1,5).

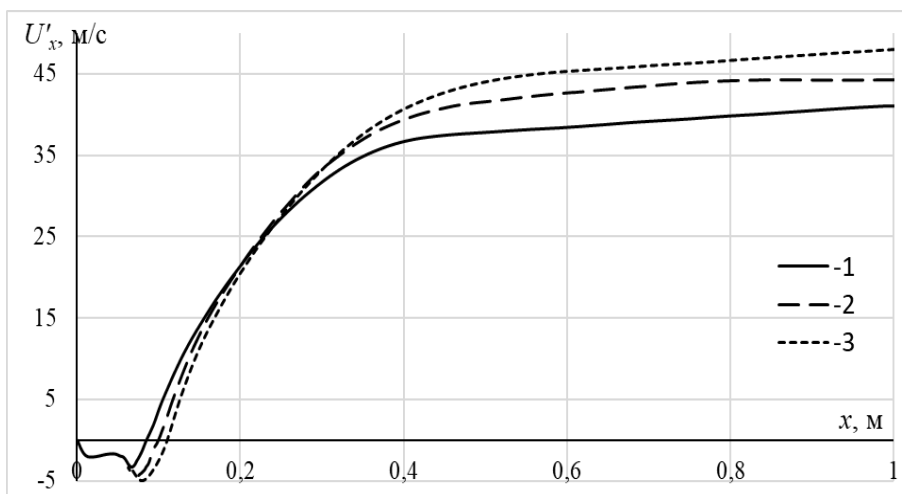


Рис. 4. Розподіл швидкості U_x по довжині каналу за стабілізатором полум'я в площині, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (1), другу (2) та третю (3) секцію

Fig. 4. Distribution of the velocity U_x along the length of the channel behind the flame stabilizer in the plane passing through the axis of the gas supply holes, when fuel is supplied to the first (1), second (2) and third (3) sections

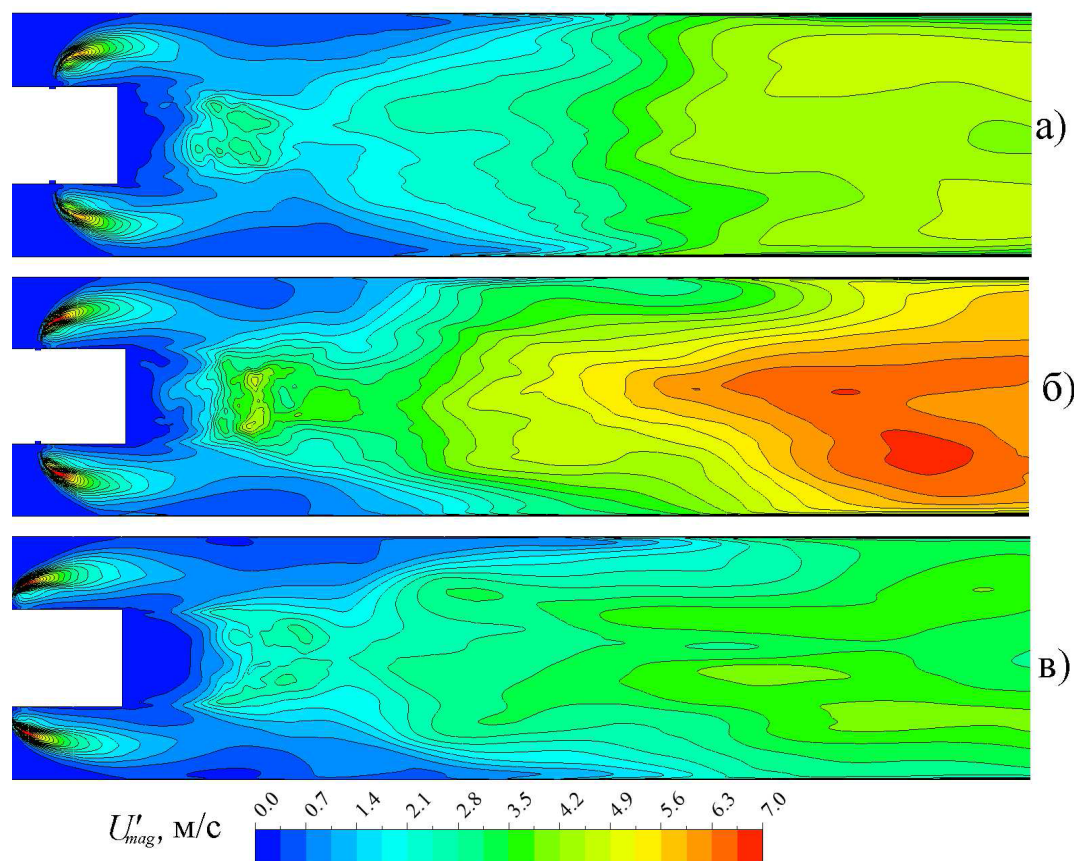


Рис. 5. Поле середньоквадратичних пульсацій швидкості U'_{mag} у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію

Fig. 5. Field of root-mean-square velocity pulsations U'_{mag} 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

2. Виконано порівняльний аналіз характеристик течії при подачі паливного газу в різні ряди газоподавальних отворів. Показано, що ці характеристики можуть суттєво залежати від номера ряду паливоподачі. А саме, з його збільшенням:

- змінюються показники зони рециркуляції за стабілізатором полум'я – помітно зростає її протяжність та максимальні по модулю значення швидкості в цій зоні;
- зростають в цілому рівні швидкості потоку; область підвищених швидкостей поблизу вихідного перерізу каналу охоплює все більшу частину поперечного перерізу каналу;
- спостерігається немонотонний характер зміни в цілому рівня пульсацій швидкості. Найвищому рівню відповідає паливоподача в другу секцію, нижчому – в першу і найнижчому – в третю. Наводиться інтерпретація даного ефекту на основі певних конкуруючих факторів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaaya O.E., Milko E.I., 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. Технологические системы, 2018. 3(38). С. 37-43.
2. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Кутняк О.М. CFD моделювання робочих процесів пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності нішових порожнин. III International scientific and practical conference «Interaction of society and science: problems and prospects», 2021, October 05-08 London, England. P.436-438.
3. Бутковский Л.С., Грановская Е.А., Фіалко Н.М. Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток. Технологические системы". 2010. №3(52). С. 72-76.

4. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Фиалко Н.М., Строкин В.Н., Швецова Л.А. Повышение устойчивости факела при подаче газа в зону рециркуляции за стабилизатором. Технологические системы. 2011. № 3(56). С.74-81.
5. 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. Т. 33. №1. С. 51-56.
6. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Коханенко П.С., Полозенко Н.П. Математическое моделирование динамики течения и смесеобразования при сжигании топлива в горелочных устройствах струйно-нишевого типа. Промислова теплотехника. 2009. Т.31. №7. С.24.
7. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Рокитько К.В. Особливості течії і сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях з асиметричним паливорозподіленням. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т.41. №1. С. 11-19.
8. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О. Аэродинамика і сумішоутворення в пальниках з багаторядною струменевою системою паливopодачі. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. №2. С. 34-44. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.4>
9. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Полозенко Н.П., Чехаровська М.І., Дашковська І.Л., Хміль Д.П., Кліщ А.В., 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>
10. Фиалко Н.М., Майсон М.В., Абдулін М.З., Ганжа М.В., Рокитько К.В., Озеров А.А., Хміль Д.П. Закономірності течії в прямокутних кільцевих нішах циліндричних стабілізаторних пальників різної потужності. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. Вип. 240. С. 69-76
11. Абдулін М., Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Тимощенко О.Б., Юрчук В.Л., Іваненко Г.В., Кліщ А.В. Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Т. 27. №3. С. 131-135.
12. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Абдулин М.З., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Ольховская Н.Н., Резраги А., Евтушенко А.А. Компьютерное моделирование течения в микрофакельных горелочных устройствах с асимметричной подачей топлива. Науковий вісник НЛТУ України, 2018. Т.28. № 8. С.117-121.
13. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Меранова Н.О., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Кутняк О.Н. Влияние высоты пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения в микрофакельных горелочных устройствах. Енергетика і автоматика. 2021. №3. С.51-61. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.03.005>
14. Шеренковский Ю. В., Фиалко Н. М., Прокопов В. Г., Меранова Н. О., Альошко С. О., Юрчук В. Л., Кліщ А. В., Бетін Ю. О., Рокитько К. В., Дашковська І. Л. Вплив параметрів паливopодачі на закономірності течії в мікрофакельних пальниках. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2024. № 9. С. 88-92 <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10340>
15. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Малецкая О.Е., Кліщ А.В., Дашковская И.Л. Закономерности течения в микрофакельных горелочных устройствах с пластинчатыми турбулизаторами потока. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2021. №9. С. 62-67. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7407>
16. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовський Л.С., Шеренковский Ю.В., Алешко 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.
17. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Прокопов В.Г., Полозенко Н.П., Алешко С.А., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Озеров А.А., Кутняк О.Н., Бутовский Л.С. Особенности течения в микрофакельных горелках с подковообразным расположением стабилизаторов пламени. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 209 (1). С. 191-199.
18. Fialko N., Meranova N., Sherenkovskii Ju., Aleshko S., Prokopov V., Abduhin M., Babak V., Korzhuk V., Zhelykh V., Khaskin V. Establishment of regularities of isothermal flow and mixture formation in microjet burners with three-row jet fuel supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6(8 (120)). P.65–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267891>

19. Фіалко 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.
20. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Альошко С.О., Меранова 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. С.19-26. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.2>
21. Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Шеренковский Ю. В., Меранова Н. О., Алешко С. А., Майсон Н. В., Полозенко Н.П., Степанова А. И. CFD моделирование температурных полей в горелочных устройствах с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени. Технологические системы. 2016. №2(75). С. 92-99.
22. Фіалко Н.М., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Бутовский Л.С. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа. Технологические системы. 2012. 58/1. С.52-57.
23. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Альошко С.О., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Полозенко Н.П., Малецька О.Є. Вплив ширини стабілізатора на аеродинамічні та теплові характеристики систем охолодження мікрофакельних пальникових пристроїв. Науковий вісник НЛТУ України. 2013. 23.7. С.83-87.
24. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Малецкая О.Е., Ночовный А.В. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 72-76.
25. Фіалко Н.М., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Тимощенко О.Б., Кліщ А.В., Реграгі А., Ганжа М.В. Моделювання турбулентних течій в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності прямокутних нішових порожнин. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2020. №12. С.43-48. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-12-6214>
26. Фіалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Юрчук В.Л., Полозенко Н.П., Рокитько К.В., Дашковська І.Л., Ганжа М.В., Сороковой Р.Я. Особливості течії і теплообміну у внутрішній порожнині стабілізатора полум'я за наявності та відсутності ніш на його бічних поверхнях. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2021. №16. С.78-83. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-16-7654>
27. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Юрчук В.Л., Полозенко Н.П., Рокитько К.В., Реграгі А., Ганжа М.В. Вплив навантаження вогнетехнічного об'єкта на характеристики течії і теплообміну у системі охолодження стабілізатора полум'я. Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2021. №17. С.23-29. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-17-7715>
28. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Yu.V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Hanzha M.V. Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27-28, 2018. Brno: Baltija Publishing. P.189-192
29. Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимощенко О.Б., Сірий О.А., Шеренковский Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А., Кліщ А.В., 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.
30. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.А., Ганжа М.В., Юрчук В.Л., Швецова Л.А. Комп'ютерне моделювання процесів теплопереносу в мікрофакельних пальникових пристроях з термобар'єрними покриттями. Науковий вісник НЛТУ України, 2017. Т. 27. № 5. С. 130-133.

FLOW STRUCTURE DURING COMBUSTION OF NATURAL GAS IN BURNERS WITH A THREE-ROW FUEL SUPPLY SYSTEM

Fialko N.M.¹, Sherenkovskiy Ju.², Klishch A.³, Meranova N.⁴, Aleshko S.⁵, Martiuk O.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 str., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

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

³Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Junior Researcher, orcid.org/0009-0001-3449-0381, e-mail: klishch.andrii@gmail.com

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., 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 str., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, orcid.org/0000-0002-0430-7144, e-mail: s_aleshko@ukr.net

⁶Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Junior Researcher, e-mail: martiuk.o76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.8>

The objective of the work is to establish the regularities of the flow of a single gas in micro-jet burner devices with a three-row fuel supply system. The burner devices under consideration are intended for operation under conditions of variable values of the total excess air coefficient, 1.1 ... 1.5. The objective of the study was to determine the effects of the influence of the row number of gas supply holes on various characteristics of the non-isothermal flow in the proposed burners. CFD modeling based on the DES approach was used as a research method.

Based on the results of the comparative analysis of the flow characteristics when feeding fuel gas to different rows of gas supply holes, it is shown that these characteristics can

significantly depend on the row number of the fuel supply. It was found that with an increase in the row number, the indicators of the recirculation zone behind the flame stabilizer change significantly. The levels of flow rates, velocity pulsations, etc.

The research results can be used in the design of micro-flare burners of the stabilizer type.

References 30, Fig. 5, Tabl. 1.

Key words: computer modeling, micro-flare burners, natural gas combustion, flow structure.

1. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., 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. *Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.]* 2018. 3(38). P. 37-43.

2. Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Kutnyak O.M. [CFD modeling of working processes of burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of niche cavities]. III International scientific and practical conference «Interaction of society and science: problems and prospects», 2021, October 05-08. London, England. P.436-438. (in ukr.)

3. Butovsky L.S., Granovskaya E.A., Fialko N.M. [Stability of the torch behind a flat stabilizer when gas is supplied by injection into the air flow]. *Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.]* 2010. №3(52). P. 72-76. (in rus.)

4. Butovsky L.S., Granovskaya E.A., Fialko N.M., Strokin V.N., Shvetsova L.A. [Increasing the stability of the torch when feeding gas into the recirculation zone behind the stabilizer]. *Tekhnologicheskie sistemy [Technological Systems.]* 2011. № 3(56). P.74-81. (in rus.)

5. Fialko N.M., Butovsky L.S., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.A., Polozenko N.P. [Computer modeling of the mixture formation process in stabilizer-type burner devices with gas supply by injection into the blowing air flow]. *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*. 2011. V. 33. №1. P. 51-56. (in rus.)

6. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Abdulin M.Z., Butovskiy L.S., Kokhanenko P.S., Polozenko N.P. [Mathematical modeling of flow dynamics and mixture formation during fuel combustion in jet-niche burner devices]. *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*. 2009. V.31. №7. P.24. (in rus.)

7. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Rokitko K.V.* [Features of flow and mixture formation in micro-jet burners with asymmetric fuel distribution]. *Teplofizika ta teploenerfetyka* [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2019. V.41. №1. P. 11-19. (in ukr.)
8. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A.* [Aerodynamics and mixture formation in burners with a multi-row jet fuel supply system]. *Teplofizika ta teploenerfetyka* [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2023. №2. P. 34-44. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.4> (in ukr.)
9. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Chekharovskaya M.I., Dashkovskaya I.L., Khmil D.P., Kleshch A.V., Popruzhuik I.A.* [Effects of the jet fuel feed row number on the flow and mixture formation characteristics in micro-jet burner devices]. *Mizhnarodnyi naukovi zhurnal "Internauka"* [International Scientific Journal "Internauka"]. 2023. №6(140). P. 65-70. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-6-8767> (in ukr.)
10. *Fialko N.M., Maison M.V., Abdulin M.Z., Ganzha M.V., Rokitko K.V., Ozerov A.A., Khmil D.P.* [Regularities of flow in rectangular annular niches of cylindrical stabilizer burners of different capacities]. *Naukovyy visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny* [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine]. 2016. Issue. 240. P. 69-76. (in ukr.)
11. *Abdulin M., Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Butovskiy L.S., Timoshchenko O.B., Yurchuk V.L., Ivanenko G.V., Klishch A.V.* [Structure of the flow in the turbulator system - a niche cavity]. *Naukovyy visnyk NLTU* [Scientific Bulletin of UNFU]. 2017. V. 27. №3. P. 131-135. (in ukr.)
12. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Abdulin M.Z., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Olkhovskaya N.N., Regragi A., Evtushenko A.A.* Computer modeling of flow in micro-jet burners with asymmetric fuel supply. *Naukovyy visnyk NLTU* [Scientific Bulletin of UNFU]. 2018. V.28. № 8. P.117-121. (in rus.)
13. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Meranova N.O., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Kutnyak O.N.* [Influence of the height of plate flow turbulators on the flow characteristics in micro-jet burner devices]. *Energetika i avtomatika*. [Energy and Automation]. 2021. №3. P.51-61. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.03.005/> (in rus.)
14. *Sherenkovskiy Yu. I., Fialko N. M., Prokopov V. G., Meranova N. O., Aleshko S. O., Yurchuk V. L., Klishch A. V., Betin Yu. O., Rokitko K. I., Dashkovskaya I. L.* [Influence of fuel supply parameters on flow patterns in microflare burners]. *Mizhnarodnyi naukovi zhurnal "Internauka"* [International Scientific Journal "Internauka"]. 2024. № 9. P. 88-92 <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10340> (in ukr.)
15. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Maletskaya O.E., Klishch A.V., Dashkovskaya I.L.* [Flow patterns in micro-jet burner devices with plate flow turbulators]. *Mizhnarodnyi naukovi zhurnal "Internauka"* [International Scientific Journal "Internauka"]. 2021. №9. p. 62-67. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7407> (in rus.)
16. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Butovskiy L.S., Sherenkovskiy 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]. *Promyshlennaia teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2011. №2. p. 59-64. (in rus.)
17. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Prokopov V.G., Polozenko N.P., Aleshko S.A., Maletskaya O.E., Milko E.I., Ozerov A.A., Kutnyak O.N., Butovskiy L.S.* [Features of the flow in microjet burners with a horseshoe-shaped arrangement of flame stabilizers]. *Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny* [Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine]. 2015. № 209 (1). P 191-199. (in rus.)
18. *Fialko N., Meranova N., Sherenkovskii Ju., Aleshko S., Prokopov V., Abdulin M., Babak V., Korzhyk V., Zhelykh V., Khaskin V.* Establishment of regularities of isothermal flow and mixture formation in microjet burners with three-row jet fuel supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 6(8 (120)). P.65–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267891>
19. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Butovskiy L.S., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Aleshko S.A., Kokhanenko P.S., Polozenko N.P.* [Modeling the structure of isothermal flow in an echeloned lattice of flat stabilizers in flame burners]. *Promyshlennaia teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2010. №6. P. 28-36. (in rus.)
20. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Alyoshka S.O., Meranova N.O., Rokitko K.V.* [Flow structure in burner devices with asymmetric fuel distribution for reacting flows and isothermal conditions]. *Teplofizika ta teploenerfetyka* [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2020. V. 42. №1. P.19-26. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.2> (in ukr.)

21. Fialko N. M., Prokopov V. G., Sherenkovskiy Ju. V., Meranova N. O., Aleshko S. A., Maisov N. V., Polozenko N. P., Stepanova A. I. [CFD modeling of temperature fields in burner devices with echeloned arrangement of flame stabilizers]. *Tekhnologicheskie sistemy* [Technological Systems.] 2016. №2(75). P. 92-99. (in rus.)
22. Fialko N.M., Aleshko S.A., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Timoshchenko A.B., Abdulin M.Z., Butovskiy L.S. [Efficiency of cooling systems of jet-stabilizer type burner devices]. *Tekhnologicheskie sistemy* [Technological Systems.]. 2012. 58/1. P52-57. (in rus.)
23. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Polozenko N.P., Maletskaya O.E. [Influence of stabilizer width on aerodynamic and thermal characteristics of cooling systems of microjet burner devices]. *Naukovyi visnyk NLTU* [Scientific Bulletin of UNFU]. 2013. 23.7. P.83-87. (in ukr.)
24. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Timoshchenko A.B., Abdulin M.Z., Maletskaya O.E., Nochovny A.V. [Analysis of the influence of the geometric shape of a niche cavity on the aerodynamic drag of the channel]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2012. №1. P. 72-76. (in rus.)
25. Fialko N.M., Polozenko N.P., Kutnyak O.M., Timoshchenko O.B., Klishch A.V., Regragi A., Ganzha M.V. [Modeling of turbulent flows in micro-jet burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of rectangular niche cavities]. *Mizhnarodnyi naukovi zhurnal "Internauka"* [International Scientific Journal "Internauka"]. 2020. №12. P.43-48. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-12-6214> (in ukr.)
26. Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Yurchuk V.L., Polozenko N.P., Rokitko K.V., Dashkovskaya I.L., Ganzha M.V., Sorokov R.Ya. [Features of flow and heat transfer in the internal cavity of a flame stabilizer with and without niches on the side surfaces]. *Mizhnarodnyi naukovi zhurnal "Internauka"* [International Scientific Journal "Internauka"]. 2021. №16. P.78-83. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-16-7654> (in ukr.)
27. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Yurchuk V.L., Polozenko N.P., Rokitko K.V., Regragi A., Ganzha M.V. [Influence of the load of a fire-engineering object on the characteristics of flow and heat transfer in the cooling system of a flame stabilizer]. *Mizhnarodnyi naukovi zhurnal "Internauka"* [International Scientific Journal "Internauka"]. 2021. №17. P.23-29. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-17-7715> (in ukr.)
28. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Hanzha M.V. Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings. The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27-28, 2018. Brno: Baltija Publishing. P.189-192
29. Abdulin M.Z., Fialko N.M., Timoshchenko O.B., Sery A.A., Sherenkovskiy Ju.V., Milko E.I., Ozerov A.A., Klishch A.V., Olkhovskaya N.M., Shvetsova L.Ya. [Temperature regimes of reverse current zones in the near wake of cylindrical flame stabilizers]. *Naukovyi visnyk NLTU* [Scientific Bulletin of UNFU]. 2018.28. №3. P.97-100. (in ukr.)
30. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.A., Aleshko S.A., Ganzha M.V., Yurchuk V.L., Shvetsova L.A. [Computer modeling of heat transfer processes in micro-flare burner devices with thermal barrier coatings]. *Naukovyi visnyk NLTU* [Scientific Bulletin of UNFU], 2017. T. 27. № 5. C. 130-133. (in ukr.)

Отримано 04.06.2025

Received 04.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025

Accepted for publication 05.08.2025