

Технічні науки

УДК 662.61:621

**Фіалко Наталія Михайлівна**

*доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України, завідувач відділу  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Fialko Nataliia**

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

**Прокопов Віктор Григорович**

*доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Prokopov Viktor**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Шеренковський Юлій Владиславович**

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

**Sherenkovskiy Julii**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Меранова Наталія Олегівна**

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

**Meranova Nataliia**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Альошко Сергій Олександрович**

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

**Aleshko Sergey**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Кутняк Ольга Миколаївна**

*науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Kutnyak Olha**

*Scientific Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Абдулін Михайло Загретдинович**

*доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України;  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Abdulin Mykhailo**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine;  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

**Рокитько Костянтин Володимирович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Rokitko Konstantin**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Малецька Ольга Євгенівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Maletska Olha**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Хміль Дмитро Петрович**

*молодший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Khmil Dmytro**

*Junior Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**ОСОБЛИВОСТІ АЕРОДИНАМІКИ І ЗМІШУВАННЯ ПАЛИВА ТА  
ОКИСНЮВАЧА В ПАЛЬНИКАХ З ТРИРЯДНОЮ  
ПАЛИВОПОДАЧЕЮ**

**FEATURES OF AERODYNAMICS AND MIXING OF FUEL AND  
OXIDIZER IN BURNERS WITH THREE-ROW FUEL SUPPLY**

*Анотація.* Наводяться результати досліджень закономірностей впливу відносного кроку розташування газоподавальних отворів в пальниках стабілізаторного типу з трирядною подачею паливного газу.

**Ключові слова:** пальники стабілізаторного типу, процеси течії і сумішоутворення, трирядна паливоподача, математичне моделювання.

**Summary.** The results of studies of the regularities of the influence of the relative step of the gas supply holes in stabilizer-type burners with a three-row fuel gas supply are presented.

**Key words:** stabilizer type burners, flow and mixture formation processes, three-row fuel supply, mathematical modeling.

**Актуальність роботи** зумовлена необхідністю всебічного дослідження робочих процесів нових перспективних модифікацій мікрофакельних пальникових пристроїв. При цьому особливої уваги потребують дослідження аеродинаміки і сумішоутворення в таких пальниках. Від перебігу вказаних процесів значною мірою залежить формування теплового стану зони горіння, ефективність вигорання палива тощо.

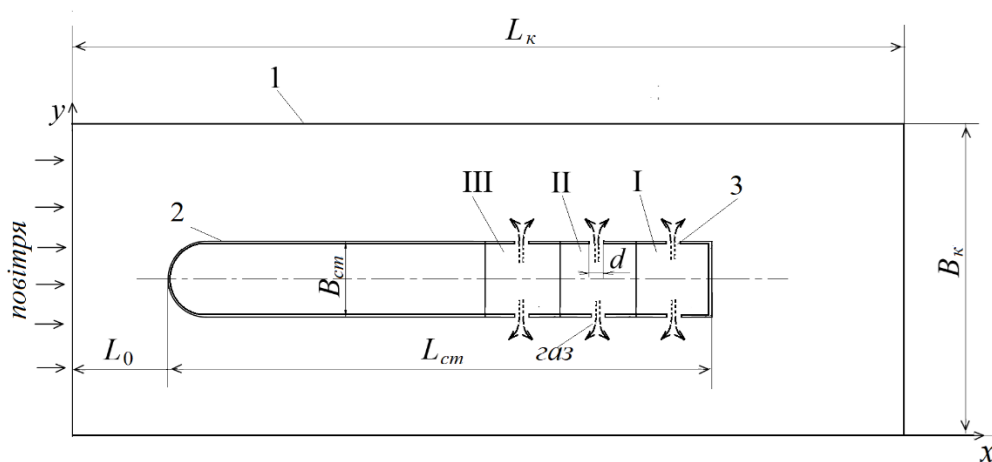
Виконаний аналіз літературних джерел свідчить, що все більш поширеним і ефективним методом вивчення робочих процесів пальникових пристроїв стає комп'ютерне моделювання [1-15].

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є встановлення ефектів впливу взаємного розташування газоподавальних отворів на характеристики течії і сумішоутворення в нових мікрофакельних пальниках з трирядною системою струменевої паливоподачі. Ставилось також завдання визначення геометричних характеристик системи подачі паливного газу, які відповідають необхідним умовам змішування палива і окиснювача безпосередньо за стабілізатором полум'я.

**Фізична та математична постановка задачі.** Розглядаються процеси ізотермічної течії і сумішоутворення в пропонованих пальниках з трирядною паливоподачею, які орієнтовані на експлуатацію в умовах змінних значень коефіцієнта надлишку повітря. При конструюванні

вказаних пальників застосовується модульний принцип. Зважаючи на практичну ідентичність процесів горіння за окремими модулями, при проведенні досліджень можна обмежитися розглядом окремого модуля.

На рис 1 наведено схему модуля пропонованого пальникового пристрою. Модуль складається з плоского стабілізатора полум'я 2, розташованого в каналі 1. Паливоподача реалізується через одну з трьох секцій. Перша секція відповідає подачі паливного газу при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1,1$ , друга –  $\alpha = 1,3$  третя –  $\alpha = 1,5$ . Подача паливного газу в зносячий потік окиснювача здійснюється через трирядну систему газоподавальних отворів на бічних поверхнях стабілізатора полум'я.



**Рис. 1. Схема модуля пальникового пристрою стабілізаторного типу з трирядною системою паливоподачі: 1 – плоский канал; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; I, II, III – секції газоподачі з різними значеннями відносного кроку розташування отворів, що відповідають різним значенням коефіцієнта надлишку повітря**

Математична модель досліджуваного процесу 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 суцільності

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

- рівняння збереження маси і-го хімічного компонента

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i, \quad i=1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

– рівняння стану для багатоконпонентної суміші

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T \sum_i^N \frac{Y_i}{M_i}}, \quad (4)$$

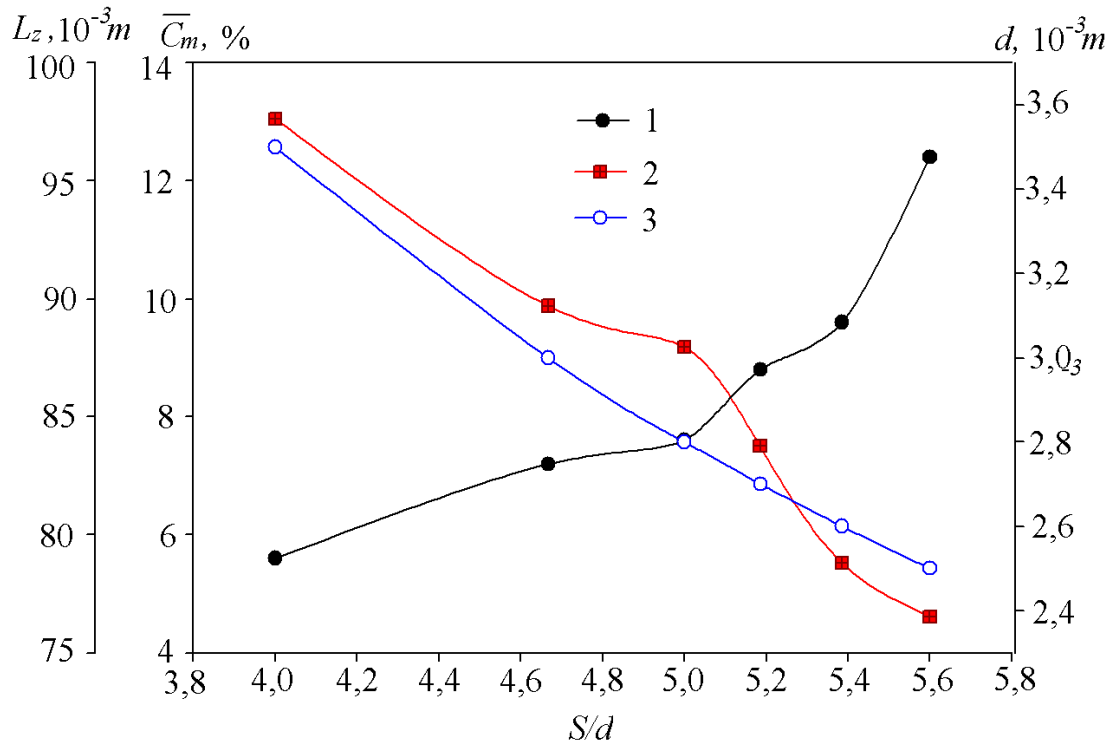
де  $\vec{U}$  – вектор швидкості;  $\tau$  – час;  $P$  – статичний тиск;  $S^*$  – тензор напружень, що враховує в'язкі напруження та додаткові напруження, зумовлені турбулентністю;  $\rho$  – густина;  $Y_i$  – масова концентрація і-го компонента;  $\vec{J}_i$  – потік маси і-го компонента, зумовлений дифузиею та турбулентним переносом;  $M_i$  – молекулярна маса і-го компонента;  $N$  – кількість компонентів суміші;  $T$  – абсолютна температура;  $R$  – універсальна газова стала.

#### **Аналіз результатів комп'ютерного моделювання.**

На рис. 2 наведено результати досліджень з визначення залежності характеристик течії і сумішоутворення від відносного кроку розташування газоподавальних отворів. Приведені дані відповідають таким вихідним параметрам:  $B_{cm} = 0,03$  м;  $B_k = 0,075$  м;  $L_k = 1,3$  м;  $L_0 = 0,1$  м;  $L_{cm} = 0,2$  м;  $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м. Відстань  $L_1$  між зривною кромкою стабілізатора і першим, другим і третім рядом газоподавальних отворів  $L_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  м;  $20 \cdot 10^{-3}$  м;  $30 \cdot 10^{-3}$  м; коефіцієнт загромождження прохідного перерізу каналу  $k_f = 0,4$  ( $k_f = B_{cm}/B_k$ ); швидкість повітря на вході до каналу  $U_{vx}^n = 10$  м/с; інтенсивність турбулентності  $Tu$  у вхідному перерізі каналу  $Tu = 3\%$ . Як паливо використовувався природний газ, як окиснювач – повітря.

Як видно з рис. 2, при збільшенні відносного кроку  $S/d$  розташування газоподавальних отворів має місце зростання довжини зони зворотних токів  $L_z$  у закормовій області стабілізатора полум'я. При цьому вказане зростання є нерівномірним. Воно виявляється відносно незначним при збільшенні  $S/d$

від 4,0 до 5,0. Інтенсивність даного зростання помітно збільшується в діапазоні значень  $S/d$  від 5,0 до 5,6.



**Рис. 2.** Залежність характеристик зони зворотних токів за стабілізатором полум'я і діаметра газоподавальних отворів  $d$  від відносного кроку їх розташування при  $\alpha=1,1$ ;  $L_1=10 \cdot 10^{-3} m$ : 1 – довжина зони зворотних токів  $L_z$ ; 2 – середні значення концентрації метану  $\bar{C}_m$  в даній зоні; 3 – діаметр газоподавальних отворів.

Як свідчать отримані дані, значення відносного кроку  $S/d$  спричиняє також суттєвий вплив на характеристики сумішоутворення палива і окиснювача. Так, середня концентрація метану  $\bar{C}_m$  в зоні зворотних токів за стабілізатором полум'я помітно знижується. Характер цього зниження відповідає в певному сенсі картині зміни довжини зони зворотних токів  $L_z$ . А саме, зниження величини  $\bar{C}_m$  в області більших значень відносного кроку розташування газоподавальних отворів є більш значним.

Результати розв'язання задачі з визначення конструктивних параметрів системи подачі паливного газу, що відповідають сприятливим умовам сумішоутворення в зоні стабілізації полум'я, наведено в табл. 1

Таблиця 1

**Раціональні конструктивні параметри системи трирядної струменевої подачі палива**

Параметри	$N_R$		
	1	2	3
$\alpha$	1,1	1,3	1,5
$L_1, 10^{-3}M$	10	20	30
$S/d$	5,4	5,6	5,8
$d, 10^{-3}M$	2,6	2,5	2,7

Відповідні значення середніх концентрацій метану  $\bar{c}_m$  представлено в табл. 2.

Таблиця 2

**Середнє значення концентрації метану в зоні зворотних токів за стабілізатором полум'я  $\bar{c}_m$ , що відповідає раціональним конструктивним параметрам системи трирядної струменевої подачі палива та  $\delta$**

Параметри	$N_R$		
	1	2	3
$\alpha$	1,1	1,3	1,5
$\bar{c}_m, \%$	5,5	5,4	6,1
$\delta, \%$	6,8	8,3	3,4

Як видно, пропоновані значення  $S/d$  зростають від першої до третьої секції паливоподачі, а значення діаметрів газоподавальних отворів зменшуються.

**Висновки.** Виконано комплекс CFD моделювання з визначення ефектів впливу відносного кроку розташування газоподавальних отворів на характеристики течії і сумішоутворення палива і окиснювача в мікрофакельних пальникових пристроях з трирядною паливоподачею.



## Література

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., Evtushenko A.A. 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. 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., 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. doi: 10.15587/1729-4061.2015.39193; URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/39193/37251>
4. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., 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. № 1. С. 52-57. URL: <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/309/316>
5. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskii 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.

6. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Миргородский А.Н. Компьютерное моделирование процессов переноса в системах охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа. Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34, №1. С. 64-71.
7. 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.
8. 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.
9. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. Наук. вісник НЛТУ України. 2014. Вип. 24.5 С. 136-142. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu\\_2014\\_24.5\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2014_24.5_24)
10. 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.
11. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин 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.
12. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алёшко С.А., Абдулин М.З., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Ольховская Н.Н., Реграги 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. doi: <https://doi.org/10.15421/40280823>
  13. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Меранова Н.О., Рокитько К.В. CFD моделювання температурних режимів зони горіння пальників стабілізаторного типу з асиметричною подачею палива. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т. 41, №4. С. 13-18.
  14. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский 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. URL: [https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24\\_6/20.pdf](https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_6/20.pdf)
  15. 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. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. К. : ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 122-125.