Технічні науки

УДК 662.61:621

Фіалко Наталія Михайлівна
доктор технічних наук, професор,
чл.-кор. 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
of 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,
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,
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, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Ольховська Ніна Миколаївна
науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України
Olkhovska Nina
Scientific Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Полозенко Ніна Петрівна
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України
Polozenko Nina
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
of Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Юрчук Володимир Леонідович
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України
Yurchuk Volodymyr
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Чехаровська Марина Ігорівна
старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України
Chekharovska Marina
Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

ОСОБЛИВОСТІ ТЕЧІЇ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКАХ З ПОДАЧЕЮ ПАЛИВНОГО ГАЗУ З ТОРЦЯ СТАБІЛІЗАТОРА ПОЛУМ'Я

FEATURES OF THE FLOW IN MICRO-JET BURNERS WITH FUEL GAS SUPPLY FROM THE END OF THE FLAME STABILIZER

Анотація. *Розглянуто характеристики течії в мікрофакельних пальниках стабілізаторного типу при торцевій подачі газу. Досліджено вплив відношення швидкостей газу на вході у газоподавальні отвори і повітря на виході з каналу на картину циркуляційної течії в рециркуляційній зоні стабілізатора полум'я. Проаналізовано особливості вихороутворення в закормовій області стабілізатора при різних значеннях коефіцієнту загромадження прохідного перерізу каналу за умов, що розглядаються.*

Ключові слова: *мікрофакельний пальник, характеристики течії, стабілізатор полум'я, циркуляційна течія*

Summary. *The flow characteristics in micro-jet burners of the stabilizer type with end gas supply are considered. The influence of the ratio of gas velocities at the inlet to the gas-feeding holes and air at the outlet from the channel on the pattern of the circulation flow in the recirculation zone of the flame stabilizer is investigated. The features of vortex formation in the edge region of the stabilizer are analyzed for different values of the coefficient of blockage of the flow section of the channel under the considered conditions.*

Key words: *micro-jet burner, flow characteristics, flame stabilizer, circulation flow.*

Пальникові пристрої стабілізаторного типу мають цілу низку переваг, таких як можливість спалювання палива у широкому діапазоні режимів за коефіцієнтом надлишку повітря, високу повноту згоряння на часткових навантаженнях та ін. Дослідженню робочих процесів в таких пальниках присвячена велика кількість публікацій [1-11]. В даній роботі розглядаються особливості течії палива і окиснювача в мікрофакельних пальниках з подачею палива в зону рециркуляції за стабілізатором полум'я. При цьому досліджуються закономірності впливу коефіцієнта загромадження прохідного перерізу каналу k_f на картину течії у цій фізичній ситуації.

Особлива увага приділяється аналізу залежності характеристик течії від величини параметра f, який представляє собою відношення середніх швидкостей газу V_{BX}^{Γ} і повітря $U_{BИX}^{П}$ відповідно в газоподавальних отворах і на виході з міжстабілізаторного каналу ($f = \frac{V_{BX}^{\Gamma}}{U_{BИX}^{П}}$). Важливість такого аналізу обумовлена суттєвим впливом параметра f на картину циркуляційної течії у сліді за стабілізатором, і як наслідок, на закономірності сумішоутворення, стабілізації полум'я та вигорання палива.

Нижче як характерні приклади наводяться результати математичного моделювання, що відповідають значенням $k_f = 0{,}45$ і $0{,}6$ при зміні параметра f в діапазоні від 0,72 до 5,3. Величини, що варіюються при дослідженнях, наведені в таблиці. Інші вихідні параметри мали такі значення: $B_{ст} = 0{,}03$м; $L_{ст} = 0{,}22$м; $L_к = 0{,}57$м; $d = 3 \cdot 10^{-3}$м; S/d=3,2; $U_{BX}^{П}$=7 м/с; (Тут: $B_{ст}$, $L_{ст}$ – відповідно ширина і довжина стабілізатора; $L_к$ – довжина каналу; d – діаметр газоподавальних отворів; S – відстань між отворами). Теплофізичні властивості газу та повітря визначалися при температурі 27 °С;

інтенсивність турбулентності газу та повітря у вхідному перерізі становила 1%.

Таблиця 1

Параметри, що варіюються, при дослідженні закономірностей течії в умовах подачі газу в зону рециркуляції за стабілізатором

№ варіанта	k_f	V_{BX}^{Γ}, м/с	$f = \frac{V_{BX}^{\Gamma}}{U_{BИХ}^{П}}$
1	0,60	12,61	0,72
2	0,60	25,22	1,44
3	0,60	37,36	2,13
4	0,45	33,64	2,64
5	0,45	49,82	3,91
6	0,45	67,26	5,30

В розглянутих умовах подача газу здійснювалася через систему отворів діаметром $d = 3 \cdot 10^{-3}$м, розташованих з відносним кроком $S/d = 3{,}2$ посередині торця стабілізатора вздовж осі z (див. рис. 1.).

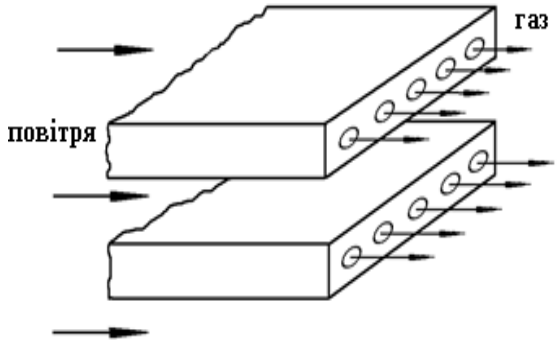

Рис. 1. Схема торцевої подачі газу в стабілізаторній решітці

Отримані в результаті комп'ютерного моделювання дані свідчать, що торцева подача газу суттєво змінює картину течії в закормовій області стабілізатора в порівнянні з ситуацією відсутності такої подачі. Так, при торцевому вдуві газу в умовах відносно невеликих значень параметра f знижується тиск у закормовій області стабілізатора, а довжина зони зворотних токів зростає. Однак подальше збільшення значень f призводить

до підвищення статичного тиску в зоні рециркуляційної течії і, відповідно до зменшення довжини зони зворотних токів $L_{зт}$.

Зупинимося дещо докладніше на аналізі результатів досліджень, які відповідають порівняно великим величинам параметра k_f (k_f = 0,6).

На рис. 2 представлені картини ліній току в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавального отвору при k_f = 0,6 для наступних величин f: f = 0,72; 1,44 та 2,13. Звертає на себе увагу дуже велика довжина області циркуляційних течій за стабілізатором для всіх розглянутих значень параметра f. (Зауважимо, що при великих величинах k_f значна протяжність зони циркуляції також має місце і в умовах відсутності торцевого вдуву газу). Основна особливість ситуації полягає в специфіці циркуляційної течії при різних величинах параметра f.

При відносно невеликих значеннях f (тобто при невисоких швидкостях газу $V_{BX}^{Г}$) у ближньому сліді за стабілізатором реалізуються два контактуючі між собою досить великі вихори (див. рис. 2 а). Перший з них розташований безпосередньо біля торцевої поверхні стабілізатора поблизу газоподавальних отворів. Його форму можна охарактеризувати як своєрідну трикутну з криволінійними сторонами та згладженими кутами. Другий, більший вихор, має специфічну конфігурацію, завдяки чому забезпечується узгодження руху вихорів як з поступальним рухом повітря, так і в плані їх взаємообертання. Формування зазначених вихорів великою мірою пов'язане з ежектуючою дією струменів газу для першого вихору, для другого – ежектуючою дією міжстабілізаторного струменя повітря.

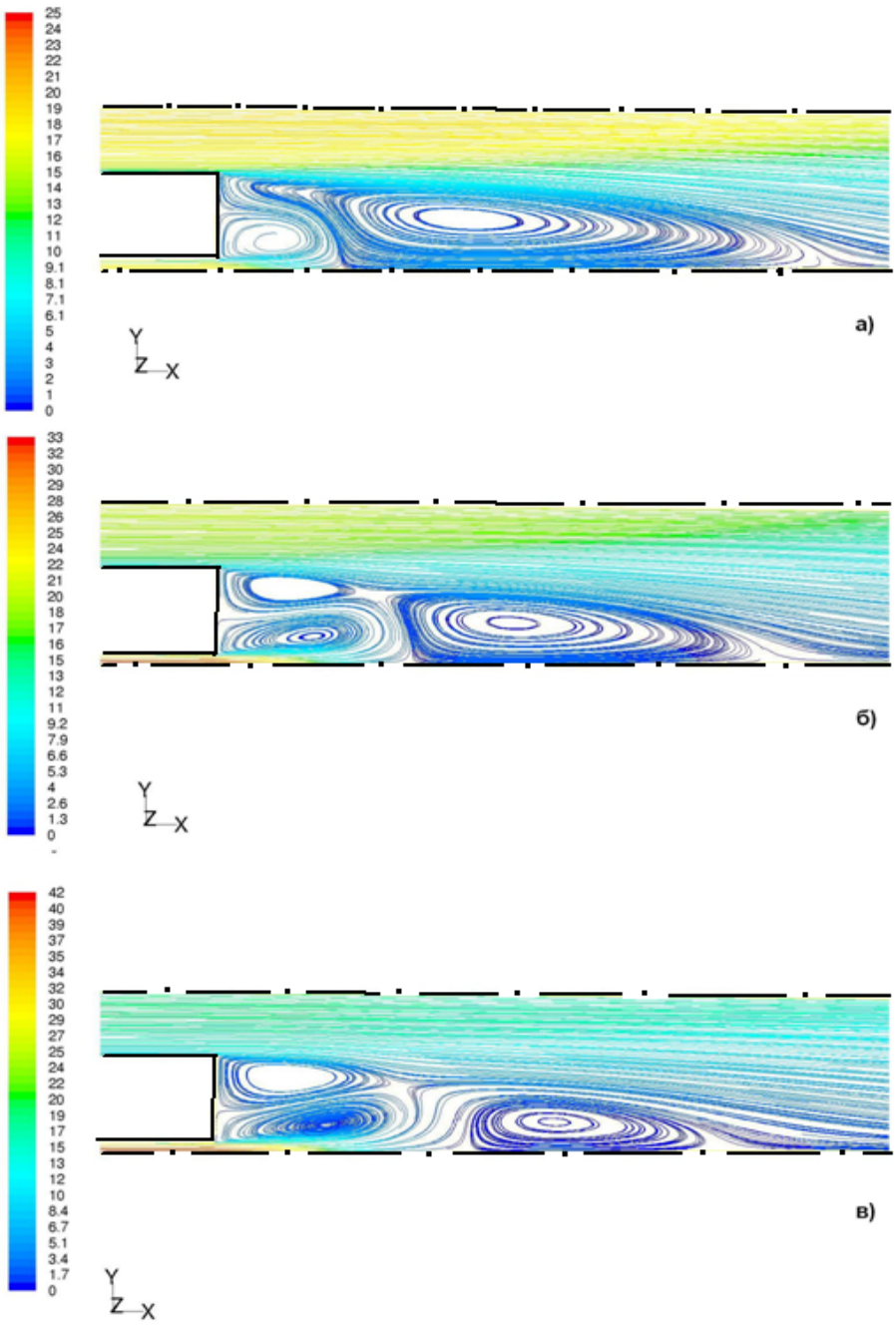

Рис. 2. Картини ліній току в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавального отвору, при k_f=0,6 для різних величин f: (а) – f = 0,72; (б) – f = 1,44; (в) – f = 2,13

З підвищенням швидкості газу V_{BX}^{Γ}, тобто зі зростанням параметра *f*, картина циркуляційної течії в сліді за стабілізатором істотно змінюється (див. рис. 2 б, в). На відміну від попередньої ситуації, тут реалізується не два, а три вихори. Таким чином, збільшення швидкості газу V_{BX}^{Γ}

супроводжується виникненням, а також зростанням додаткового вихору, розташованого над вихором, який примикає до газоподавальних отворів. При цьому зі зростанням $V_{BX}^{Г}$ останній вихор (тобто який примикає до газоподавальних отворів) помітно збільшується як за протяжністю, так і за інтенсивністю, надаючи прискорюючу дію додаткового вихору, що виникає. Що ж до крайнього вниз за потоком вихору, то при збільшенні швидкості газу $V_{BX}^{Г}$ він суттєво еволюціонує, зменшуючись у розмірах і віддаляючись як від торцевої поверхні стабілізатора, так і від інших вихорів. При цьому конфігурація зазначеного крайнього вниз за потоком вихору і вихору, який додатково виник, характеризується зазначеною вище своєрідною трикутною формою.

Розглянемо далі коротко особливості течії при відносно малих значеннях k_f (k_f = 0,45). Рис. 3 ілюструє картини ліній току в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавальних отворів, для k_f =0,45 при різних значеннях відношення швидкості газу в газоподавальних отворах $V_{BX}^{Г}$ до швидкості повітря $U_{ВИХ}^{П}$ на виході з міжстабілізаторного каналу. Як бачимо, у даному випадку структура течії суттєво відрізняється від розглянутої вище для k_f = 0,6.

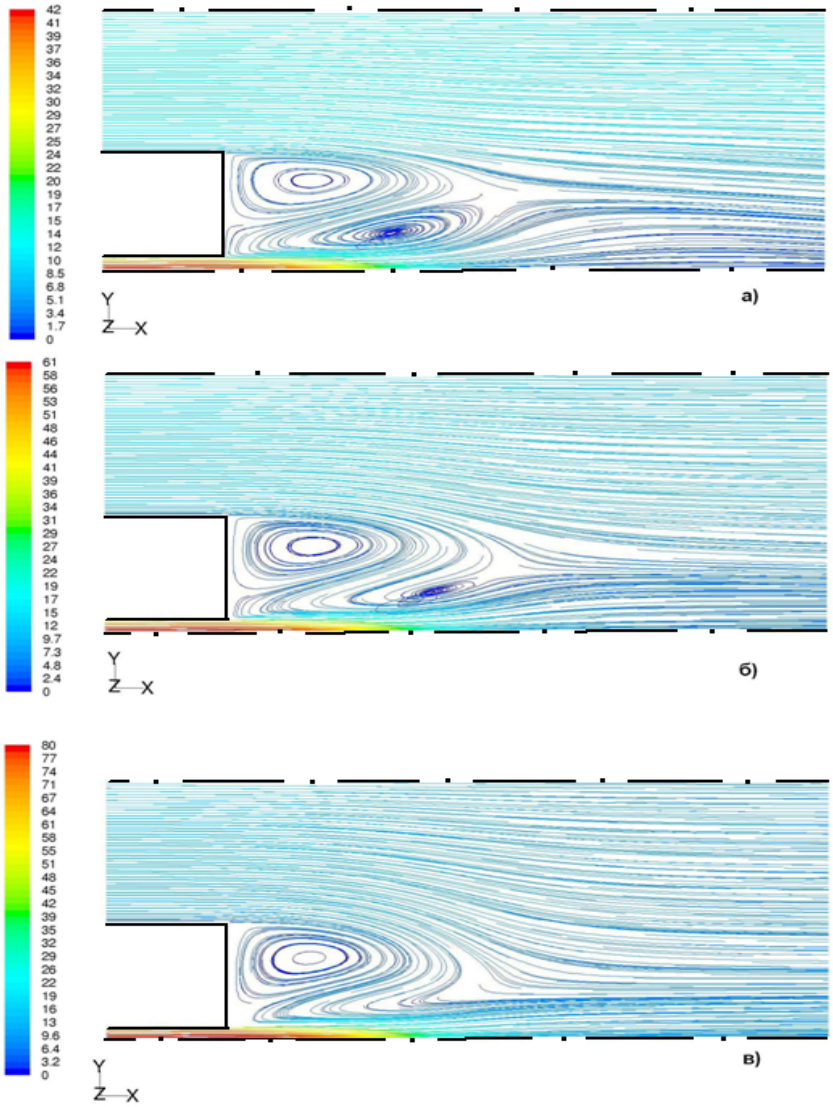

Рис. 3. Картини ліній току в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподавальних отворів, для k_f =0,45 при різних значеннях відношення швидкості газу f: (а) – f = 2,64; (б) – f = 3,91; (в) – f =5,3

Так, протяжності зон циркуляційної течії тут виявляються значно меншими. У цій ситуації при значенні параметра $f = 2{,}64$ в закормовій області стабілізатора утворюються два вихори близькі за своїми характеристиками один до одного, ніж для $k_f = 0{,}6$. Формування цих вихорів у великій мірі пов'язане, як і в розглянутій вище ситуації, з ежектуючою дією міжстабілізаторного струменя повітря, і струменів газу (див. рис. 3а). Зі збільшенням швидкості газу V_{BX}^{Γ} (тобто із зростанням параметра f) вихор, що прилягає до струменя газу, стає менш яскраво вираженим і при

подальшому підвищенні швидкості $V_{ВХ}^{Г}$ повністю вироджується (див. рис. 3 б, в).

Отже, в роботі виконано чисельні дослідження течії в стабілізаторних пальниках з торцевою подачею палива в зону рециркуляції. Встановлено ефекти впливу параметра *f*, який відповідає відношенню середніх швидкостей газу $V_{ВХ}^{Г}$ на вході в газоподавальні отвори і повітря $U_{ВИХ}^{П}$ на виході з міжстабілізаторного каналу. Показано, що від величини параметра *f* залежить протяжність зони зворотних токів, кількість і конфігурація вихорів в зоні рециркуляції тощо.

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. https://doi.org/10.29010/084.3.

2. 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. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39193.

3. 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, 2018. P. 189-192.

4. 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. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24895

5. 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.

6. 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. https://doi.org/10.15421/40280823.

7. 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. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.2.

8. Фіалко Н.М., Шеренковський 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 характеристки 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.

9. Фіалко Н.М., Меранова Н.О., Шеренковський Ю.В., Абдулін М.З., Альошко С.О., Рокитько К.В. Моделювання процесів горіння в мікрофакельних пальниках з асиметричним паливорозподілом, НАН

України, Інститут технічної теплофізики, НАН України. Київ, Миколаїв: СПД Румянцева Г.В., 2023. 212 с.

10. 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. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_6/20.pdf (дата звернення: 01.10.2024).

11. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Кутняк О.М., Рокитько К.В., Малецька О.Є., Хміль Д.П., Сороковий Р.Я. Особливості аеродинаміки і змішування палива та окиснювача в пальниках з трирядною паливоподачею. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука".* 2023. № 10(144). С. 63-67. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-10-8968.