

Технічні науки

УДК 621.1.016:621.184

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

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 Грогорович

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

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*

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*

Кліщ Андрій Володимирович

*молодший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Klishch Andrii

*Junior Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Бетін Юрій Олексійович

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

Betin Yurii

*PhD, Junior Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Рокитько Костянтин Володимирович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Rokytko Kostiantyn

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Дашковська Ірина Леонідівна

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Dashkovska Iryna

Junior Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПАЛИВОПОДАЧІ НА ЗАКОНОМІРНОСТІ
ТЕЧІЇ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКАХ
INFLUENCE OF FUEL SUPPLY PARAMETERS ON FLOW
REGULARITIES IN MICRO-FLASH BURNERS**

Анотація. В статті представлені дослідження по встановленню закономірностей впливу кроку між газовими струменями на характеристики течії в стабілізаторних пальникових пристроях зі струменевою подачею палива в зносячий потік окиснювача. При комп'ютерному моделюванні особлива увага зверталась на розгляд ефектів впливу цього кроку на величину глибини проникнення газових струменів в поперечний потік окиснювача, протяжність зон зворотних токів за стабілізатором та значення максимальних швидкостей в цих зонах.

Ключові слова: мікрофакельні пальникові пристрої, крок між струменями, струмень в зносячому потоці, математичне моделювання, зони зворотних токів

Summary. The article presents studies on establishing the patterns of the effect of the step between gas jets on the flow characteristics in stabilizer burner devices with jet fuel supply into the carried away oxidizer flow. In computer modeling, special attention was paid to considering the effects of this step on the value of the penetration depth of gas jets into the transverse oxidizer flow, the length of the reverse flow zones behind the stabilizer and the value of the maximum velocities in these zones.

Key words: microjet burners, step between jets, jet in a drift flow, mathematical modeling, reverse jet zones.

Актуальність поглиблених досліджень процесів переносу в сучасних мікрофакельних пальникових пристроях зі струменевою подачею газу в зносячий потік окиснювача через системи отворів на бокових поверхнях стабілізаторів зумовлена широким використанням пальників такого типу в енергетичному обладнанні.

Вивченню структури течії при мікрофакельному спалюванні в системі стабілізаторів полум'я приділяється особлива увага, про що свідчить проведений аналіз літератури [1-18]. Однак виконані дослідження охоплюють не всі аспекти питань, що актуальні для розробки високоефективних мікрофакельних пальників. Подальшого розвитку вимагають дослідження, що стосуються ефекту впливу різних конструктивних параметрів пальникових пристроїв на саму картину течії палива та окиснювача.

Метою даної роботи є встановлення для пальникових пристроїв стабілізаторного типу закономірностей впливу відносного кроку між газовими струменями на характеристики течії, такі як глибина h проникнення струменів в поперечний потік окиснювача, довжина $L_{зт}$ зони зворотних токів в закормовій частині стабілізатора, максимальне значення швидкості U_{max} в цій зоні.

Основним методом досліджень, що використовувався в цій роботі, було математичне моделювання. Модель процесу включала рівняння Нав'є-Стокса, нерозривності та збереження маси компонентів реагуючої суміші. Ця система рівнянь замикалась з використанням к-ε моделі турбулентності в модифікації RNG. Задача вирішувалась в тривимірній постановці з застосуванням пакету прикладних програм ANSYS. Також використовувались наближені аналітичні залежності знаходження глибини проникнення струменів.

Для умов, що розглядаються отримано залежність глибини проникнення h струменів газу в поперечний потік окиснювача від величини відносного кроку між струменями. Використовуючи вираз

$$h = k_s \cdot d \cdot \frac{V_{\Gamma}}{Vn} \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\Pi}}}, \quad (1)$$

після низки перетворень знайдено таке співвідношення

$$\frac{h}{H_K} = k_s \cdot \frac{4}{\pi \cdot L_0} \frac{S}{d \cdot \alpha} \sqrt{\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{\Gamma}}}, \quad (2)$$

де k_s – коефіцієнт, що залежить від величини S/d ; $k_s = 1,6 + 0,025(S/d - 4)$, $4 \leq S/d \leq 16$; d - діаметр газоподаючих отворів; V_{Π}, V_{Γ} - середні швидкості повітря, що набігає, і газу в газоподаючих отворах; $\rho_{\Gamma}, \rho_{\Pi}$ – густини газу та повітря; S - відстань між газовими струменями; α – коефіцієнт надлишку повітря; $L_0 = 16,8$; H_K – половина висоти міжстабілізаційного каналу.

Залежність (2) на відміну від (1) отримана для каналу кінцевих розмірів, а не до умов необмеженого потоку. Як слідство, вираз (2) може використовуватись тільки за умови $h/H_K < 1$. У широкому діапазоні зміни коефіцієнта загромадження прохідного перерізу каналу k_f формула (2), як показали дані математичного моделювання, дає задовільні результати при

$h/H_K \leq 0,8$ ($k_f = \frac{B_{CT}}{2H_K + B_{CT}}$, де B_{CT} – ширина стабілізатора).

При фіксованих значеннях α , $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{г}}$ залежність (2) може бути представлена у вигляді

$$\frac{h}{H_{\text{к}}} = A \cdot k_{\text{с}} \cdot \frac{S}{d}, \quad (3)$$

де $A = \frac{4}{\pi \cdot L_0 \cdot \alpha} \sqrt{\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{г}}}}$.

Отже, в умовах заданого типу палива, окиснювача та величини коефіцієнту надлишку повітря α відносна глибина проникнення $h/H_{\text{к}}$ є функцією тільки кроку між газовими струменями S/d . І оскільки зміна величини $k_{\text{с}} = f(S/d)$ у аналізованому діапазоні параметрів порівняно невелика, то, як видно з рис. 1, функція $h/H_{\text{к}} = f(S/d)$ дуже близька до лінійної для різних фіксованих значень коефіцієнта надлишку повітря α .

Характер залежності $h/H_{\text{к}} = f(S/d)$, представлений на рис. 1, пов'язаний з тим, що зі збільшенням S/d при незмінній величині загальної витрати газу та інших рівних умовах зростає витрата газу, що припадає на один газоподавальний отвір, і відповідно підвищується середня швидкість подачі газу $V_{\text{г}}$. Ця обставина і визначає зростання глибини проникнення струменя зі збільшенням відносного кроку S/d .

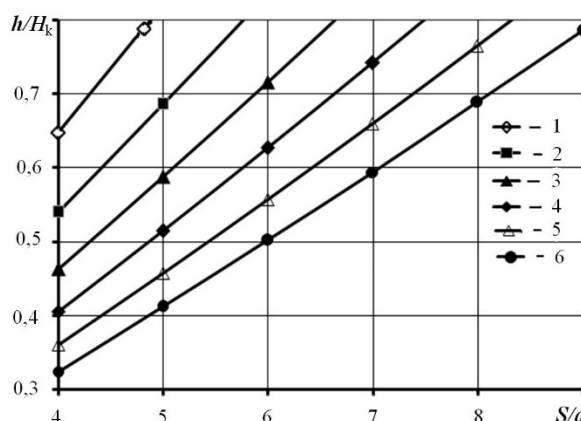


Рис. 1. Залежність відносної глибини проникнення струменів $h/H_{\text{к}}$ від кроку між ними S/d при різних значеннях коефіцієнту надлишку повітря: 1 – $\alpha = 1,0$; 2 – $1,2$; 3 – $1,4$; 4 – $1,6$; 5 – $1,8$; 6 – $2,0$

На рис. 2 та в табл. 1 наводяться результати досліджень, що отримані на основі комп'ютерного моделювання. Для визначення заявлених в вихідних даних значень швидкості газу V_{Γ} запропоновано наступний вираз

$$V_{\Gamma} = \frac{2U_{\text{ВХ}}^{\text{П}} \cdot B_{\text{СТ}} \cdot S \cdot \rho_{\text{П}}}{\pi \cdot L_0 \cdot k_f \cdot d^2 \cdot \alpha \cdot \rho_{\Gamma}}, \quad (4)$$

де $U_{\text{ВХ}}^{\text{П}}$ – швидкість повітря у вхідному перерізі каналу, в якому розташована стабілізаторна решітка.

На рис.2 а) і б) як приклад представлені картини ліній струму в поздовжньому перерізі, що проходить через центр газоподавального отвору, для величин $S/d = 6,4$ ($V_{\Gamma} = 74,75$ м/с) і $S/d = 3,56$ ($V_{\Gamma} = 41,54$ м/с) при інших фіксованих параметрах : $d = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $U_{\text{ВХ}}^{\text{П}} = 7,0$ м/с; $\alpha = 1,35$. Як видно, зі зростанням S/d спостерігається більш глибоке проникнення струменів газу в зносячий потік повітря.

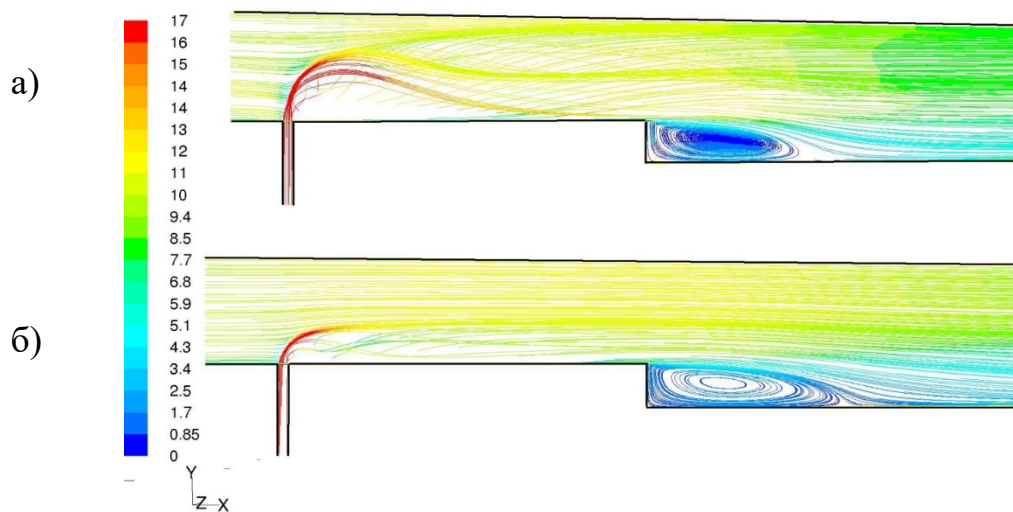


Рис. 2. Лінії струму в поздовжньому перерізі, що проходить через центр газоподавального отвору, для різних величин S/d : (а) – $S/d = 6,4$; (б) – $S/d = 3,56$

Величина відносного кроку S/d помітно впливає і на гідродинамічну ситуацію в зоні зворотних токів безпосередньо за стабілізатором, на що вказують результати комп'ютерного моделювання. Зростання зі збільшенням S/d інжектуючої дії струменя газу (тобто все більше залучення навколишнього повітря в струмінь) зумовлює додаткове підвищення

ступеня розрідження в зоні зворотних струмів за стабілізатором. Відповідно до цього при збільшенні S/d довжини зон зворотних струмів зменшуються, а максимальні швидкості в них зростають. Дані чисельних досліджень величин L_{zm} та U_{max} при різних значеннях S/d і різних відстанях L_1 між затупленою задньою кромкою стабілізатора і газоподавальними отворами представлені у табл.1.

Таблиця 1

Довжини зон зворотних струменів $L_{от}$ та максимальні значення швидкості U_{max} у даних зонах при різних значеннях відносного кроку між газовими струменями S/d та відстані L_1 для $k_f = 0,3$

$L_1, 10^{-3} \text{м}$	120		80	
S/d	6,4	3,56	6,4	3,56
$L_{от}, 10^{-3} \text{м}$	60,6	69,0	55,2	64,7
$U_{max}, \text{м/с}$	2,63	1,94	2,55	2,06

При $L_1 = 80 \cdot 10^{-3}$ м та $k_f = 0,3$ відмінності у величинах $L_{от}$ і U_{max} для значень S/d , що розглядаються, становлять відповідно 17,0 і 19,6 %, як видно з таблиці 1.

Згідно з отриманими даними зазначений ефект зростання швидкості U_{max} та зменшення величини $L_{от}$ зі збільшенням кроку S/d проявляється меншою мірою зі зростанням ступеня загромождження k_f прохідного перерізу каналу.

Висновки. В статті виявлено основні закономірності впливу відносного кроку S/d між струменями газу на характеристики течії в пальникових пристроях стабілізаторного типу зі струменевою подачею палива в зносячий потік окиснювача. Доведено, що глибина проникнення газових струменів в потік окиснювача залежить від величини відносного кроку практично лінійно. Також встановлено, що збільшення відносного кроку, яке викликає зростання інжектуючої дії газового струменя, призводить до підвищення максимальних швидкостей в зонах зворотних

струменів закормової області стабілізаторів та зменшення протяжності цих зон.

Література

1. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О. и др. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Т. 24, № 5. С. 136-142. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_5/24.pdf (дата звернення: 19.09.2024).

2. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О. и др. Влияние пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения и смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Т.24, № 6. С. 114- 121. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_6/20.pdf (дата звернення: 19.09.2024).

3. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О. и др. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т.3, № 8(69). С. 40-44. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/24895/22818> (дата звернення: 19.09.2024).

4. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовский Л.С., Шеренковский Ю.В. и др. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени. *Промышленная теплотехника*. 2011. Т. 33, № 2. С. 59-64. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60319> (дата звернення: 19.09.2024).

5. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовский Л.С., Шеренковский Ю.В. и др. Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени.

Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 6. С. 28-36. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/60617/04-FialkoNEW.pdf?sequence=1> (дата звернення: 19.09.2024).

6. Фялко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Грановская Е.А. и др. Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком. *Промышленная теплотехника*. 2010. Т. 32, № 5. С. 26-33. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/60601> (дата звернення: 19.09.2024).

7. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Алёшко С.А., Полозенко Н.П. и др. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. *Промышленная теплотехника*. 2012. 34, № 1. С. 72-76. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/59057> (дата звернення: 19.09.2024).

8. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E. et al. Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. *Technological Systems*. 2018. № 84/3. P. 37-43. <https://doi.org/10.29010/084.3>.

9. Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Abdulin M.Z. et al. Computer simulation of flow in microjet burner devices with asymmetric supply of fuel. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т. 28, № 8. С. 117-121. <https://doi.org/10.15421/40280823>.

10. Фялко Н.М., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О. и др. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа. *Технологические системы*. 2012. № 58/1. С. 52-57. URL: <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/309/316> (дата звернення: 19.09.2024).

11. Hanzha M.V., Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Yu. V. et al. Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings. 2018 – The development of technical sciences: problems and solutions. Brno: Baltija Publishing. P. 189-192.

12. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О. та ін. CFD моделювання температурних режимів зони горіння пальників стабілізаторного типу з асиметричною подачею палива. *Теплофізика і теплоенергетика*. 2019. Т. 41, № 4. С. 13-18. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.2>.

13. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О. та ін. Комп'ютерне моделювання процесів теплопереносу в мікрофакельних пальникових пристроях з термобар'єрними покриттями. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т. 27, № 5. С. 130-133. <https://doi.org/10.15421/40270526>.

14. Фіалко Н.М., Бутовський Л.С., Меранова Н.О., Рокитько К.В. та ін. Експериментальні дослідження температурного режиму в зоні горіння пальників з ешелонованими решітками стабілізаторів полум'я. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т. 27, №5 С. 77-81. <https://doi.org/10.15421/40270516>.

15. Бутовский Л.С., Грановская Е.Л., Фиалко Н.М. Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток. *Технологические системы*. 2010. № 52/3 С. 72-77. URL: <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/455/465> (дата звернення: 19.09.2024).

16. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulations, Experiments, Pollutant formation. 2001. Springer. 378 p.

17. Микулин Г. А., Любчик Г. Н. Аэродинамические характеристики и массообменные свойства трубчатых интенсификаторов горения и стабилизаторов пламени. *Энергетика: экономика, технология, экология*. 2004. Т. 15, № 2 С. 54-62. URL: http://www.old.energy.kpi.ua/files/2004_2/2004_2_11.pdf (дата звернення: 19.09.2024).

18. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., и др. Математическое моделирование структуры течения при микрофакельном сжигании топлива. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XVIII международной конференции.* (Ялта, 10-14 июня 2008). Киев, 2008. С.112-114.