Технічні науки

УДК 662.61:621

Фіалко Наталія Михайлівна
доктор технічнфх 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 the Department
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

Кліщ Андрій Володимирович
молодший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України
Klishch Andrii
Junior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Хміль Дмитро Петрович
доктор філософії, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України

Khmil Dmitro

PhD , Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Місюра Тимофій Олексійович

доктор філософії, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Tymofii Misiura

PhD , Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Мельниченко Тарас Олексійович

аспірант

Інституту технічної теплофізики НАН України

Melnychenko Taras

Postgraduate of the

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Малецька Ольга Євгенівна

старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Maletska Olha

Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

ОСОБЛИВОСТІ ПІДХОДУ ДО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ

FEATURES OF THE APPROACH TO SIMULATION OF GASEOUS FUEL COMBUSTION PROCESSES IN MICROJET BURNER DEVICES

Анотація. *Розглядаються основні особливості підходу до математичного моделювання робочих процесів мікрофакельних пальників, покликаного підвищити ефективність відповідних розрахункових досліджень. Наводиться приклад застосування даного підходу стосовно фізичної ситуації, що відповідає спалюванню палива в пальниковому пристрої з багаторядною струменевою паливоподачею.*

Ключові слова: *методи математичного моделювання, мікрофакельні пальникові пристрої, багаторядна подача паливного газу.*

Summary. *The main features of the approach to simulation of the working processes of microjet burners, designed to increase the efficiency of the corresponding computational studies, are considered. An example of the application of this approach regarding the physical situation corresponding to the combustion of fuel in a burner device with a multi-row jet fuel supply is given*

Key words: *simulation methods, microjet burners devices, multi-row supply of fuel gas.*

Математичне моделювання стає все більш важливим інструментом дослідження процесів горіння і проєктування пальникових пристроїв різного призначення. В літературних джерелах висловлюється думка, що роль даного методу дослідження вказаних процесів надалі буде зростати.

Для одержання розв'язків складних задач горіння за прийнятний час необхідно розробляти і застосовувати спеціальні підходи, що дозволяють зменшити обсяг і тривалість розрахунків.

В даній роботі запропоновано ефективний підхід до розв'язування задач горіння за поганообтічними тілами. Застосування даного підходу є особливо важливим при широких параметричних дослідженнях.

Згідно даного підходу розв'язування задачі горіння відбувається в два етапи.

Перший етап полягає у реалізації розв'язку задачі з застосуванням RANS-підходу. Такий розв'язок є вельми наближеним у фізичній ситуації, що розглядається. Це зумовлено тим, що RANS-підхід має певні обмеження щодо моделювання відривних течій за поганообтічними тілами. Однак, даний підхід дозволяє суттєво прискорити отримання розв'язку, оскільки потребує відносно незначних обчислюваних ресурсів. На даному етапі у першому наближенні визначаються раціональні конструктивні параметри пальників.

На другому етапі з метою уточнення розв'язку задачі застосовується DES метод – моделювання від'єднаних вихорів. Цей метод є гібридом традиційних рівнянь Рейнольдса, які використовуються у пристінній області, і методу моделювання крупних вихорів (LES-методу) у відривних зонах. Даний метод поєднує в собі економічність RANS і універсальність LES. Слід зауважити, що застосування методу LES потребує досить потужних обчислюваних ресурсів. З іншого боку традиційний підхід, заснований на використанні рівнянь Рейнольдса, не в змозі забезпечити прийнятну для практики точність передбачень закономірностей досліджуваних процесів. Ці обставини зумовлюють ефективність застосування комбінованого DES-підходу на другому етапі досліджень.

Нижче, до прикладу, наводяться результати математичного моделювання на основі запропонованого підходу для фізичної ситуації, що відповідає мікрофакельному спалюванню палива в пальнику з трирядною паливоподачею.

Один із шляхів реалізації такого спалювання, як відомо полягає у формуванні факелу за системою стабілізаторів полум'я. Пальникові пристрої даного типу мають низку відомих переваг і широко застосовуються в енергетичній практиці [1-16].

Далі розглядається ситуація, що відповідає мікрофакельному спалюванню палива в новій модифікації пальників з трирядною подачею паливного газу. Дана модифікація пальників призначена для умов експлуатації при змінних значеннях коефіцієнта надлишку повітря. Схема модуля досліджуваного пальника наведена на рис. 1. В каналі 1 розташовується стабілізатор полум'я 2. Паливний газ подається через одну з трьох секцій I, II, III при значенні коефіцієнта надлишку повітря відповідно 1,1; 1,3 і 1,5.

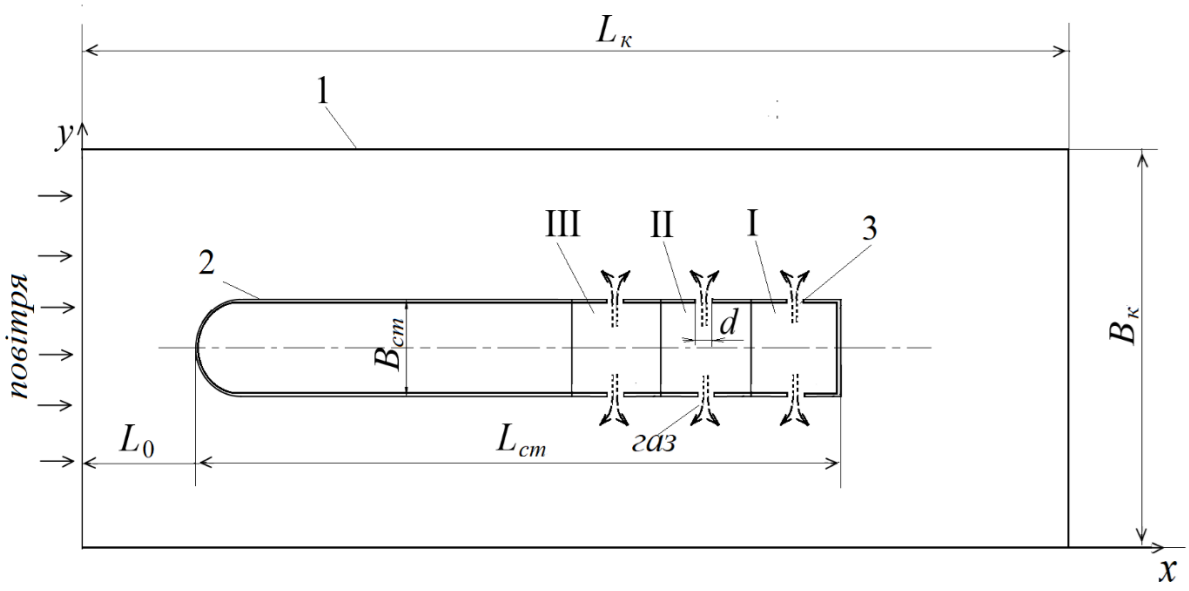


Рис. 1. Схема модуля мікрофакельного пальника стабілізаторного типу з трирядною системою подачі палива: 1 – плоский канал; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; 4 - газопідвідні патрубки; I, II, III – секції паливоподачі з різними значеннями відносного кроку розташування газоподавальних отворів, що відповідають різним значенням коефіцієнта надлишку повітря

Нижче подаються дані комп'ютерного моделювання ізотермічної течії у вищевказаних пальниках на основі запропонованого підходу. Математична модель досліджуваного процесу має вигляд:

- рівняння руху

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\rho\vec{U}\right)+\nabla\cdot\left(\rho\vec{U}\cdot\vec{U}\right)=-\nabla P+\nabla\cdot\left(S^{*}\right), \quad (1)$$

- рівняння суцільності

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

- рівняння збереження маси і-го хімічного компонента

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

– рівняння стану для багатокомпонентної суміші

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

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

Результати комп'ютерного моделювання, наведені на рис. 2, 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 загромадження прохідного перерізу каналу k_f = 0,4 (k_f = B_{st}/B_c). Значення коефіцієнта надлишку повітря α_Σ, відстань L_1 між зривною кромкою стабілізатора і відповідним газоподавальним отвором, відносний крок розташування газоподавальних отворів S/d для подачі палива у різні секції наведено в табл. 1. Швидкість повітря на вході в канал U^a_{in}=10 м/с, інтенсивність турбулентності Tu =3 %. Як паливо використовувався природний газ, як окиснювач – повітря. Необхідні

значення коефіцієнта надлишку повітря забезпечувались шляхом зміни витрати паливного газу. Тобто умови його спалювання відповідали змінній теплопродуктивності енергетичного об'єкта.

Таблиця 1

Конструктивні параметри системи трирядної струменевої подачі палива за умов змінної теплопродуктивності енергетичного об'єкта

N_R	α_Σ	L_1, 10^{-3}·м	d, 10^{-3}·м	S/d
1	1,1	40	4,3	3,72
2	1,3	50	4,2	3,81
3	1,5	60	4,1	3,90

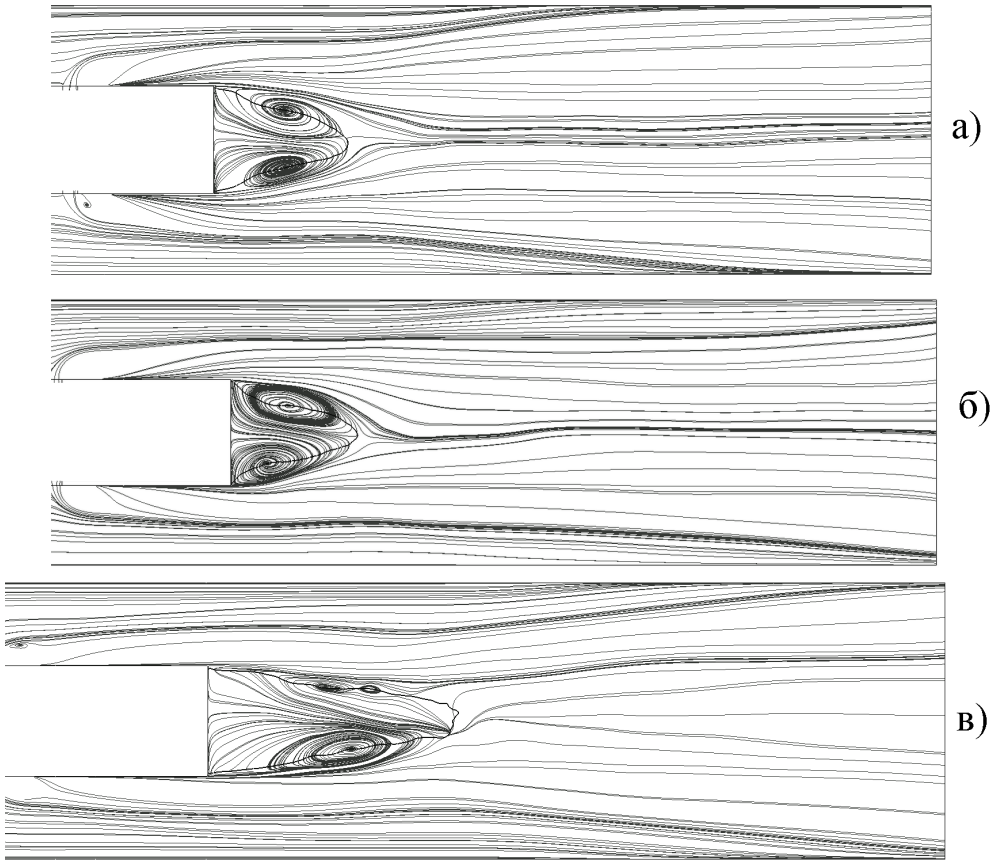


Рис. 2. Картина ліній току у поздовжньому перерізі стабілізатора полум'я, що проходить через вісь газоподавальних отворів, при подачі палива у першу (а), другу (б) та третю (в) секцію за умов змінної теплопродуктивності енергетичного об'єкта

Як видно з даних комп'ютерного моделювання, наведених на рис. 2, картина течії при подачі паливного газу у різні ряди газоподавальних отворів може суттєво відрізнятися. Так, довжина зони рециркуляції за стабілізатором полум'я помітно зростає при паливоподачі у третю секцію. При цьому значно ускладнюється структура течії в цій зоні.

Висновки.

1. Запропоновано підхід до математичного моделювання процесів горіння у пальникових пристроях, застосування якого дозволяє суттєво скоротити обсяг і тривалість відповідних розрахунків.
2. Представлено дані моделювання ізотермічної течії в мікрофакельних пальниках спеціального призначення, одержані на основі пропонованого підходу.

Література

1. 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

2. Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В. та ін 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.

3. 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

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. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., and other. Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. *Технологические системы*. 2018. 3(38). С. 37-43.

6. Фиалко Н.М., Алешко С.А., Юрчук В.Л., Малецкая О.Е., Ганжа М.В., Температурные режимы стабилизаторных горелок при нанесени и др. термобарьерных покрытий на различные участки их поверхности. *Journal of New Technologies in Environmental Science.* 2018. (3). P. 121-124.

7. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko S.A., Hanzha M.V., Polozenko N.P. and other. Mathematical modeling of temperature regimes of burners of stabilizer type with thermo-barrier coatings. *Технологические системы*. 2018. 2(38). С. 41-47.

8. Фиалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Прокопов В.Г., Меранова Н.О., Алешко С.О., Тимощенко 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 НУБіП.* 2016. Вип. 242. С. 33-40.

9. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулин М.З. Системы охлаждения микрофакельных горелочных устройств с плоскими стабилизаторами пламени Киев: изд-во «София-А», 2016. 200 с.

10. 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.

11. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О., Рокитько К.В. Особливості течії і сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях з асиметричним паливорозподілом. *Теплофізика та теплоенергетика.* 2019. № 1. С. 11-19.

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.

13. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Ганжа М.В., Юрчук В.Л., Швецова Л.А.Температурные режимы стенок стабилизаторов пламени с защитными покрытиями. *Промышленная теплотехника.* 2017. № 7. С. 31.

14. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Майсон М.В., Шеренковський Ю.В., Іваненко Г.В., Абдулін М.З., Ольховська Н.М., Швецова Л.А., Дончак М.І., Бутовський Л.С. Особенности течения и смесеобразования в микрофакельных цилиндрических горелочных устройствах различной мощности *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК».* 2014. 194/3. С. 94-101.

15. 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. *МНЖ "Інтернаука".* 2023. № 6(140). С. 65-70. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-6-8767

16. 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