

Технічні науки

УДК 536.24:533

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 the 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*

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*

Полозенко Ніна Петрівна

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

Polozenko Nina

*Candidate of Technical Sciences, Senior 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*

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*

Федосенко Леонід Петрович

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

Fedosenko Leonid

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

Дашковська Ірина Леонідівна

молодододший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Dashkovska Iryna

Junior 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

**ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
СУМІШОУТВОРЕННЯ ПАЛИВА І ОКИСНЮВАЧА В
ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ СТАБІЛІЗАТОРНОГО ТИПУ
FEATURES OF MODELING THE PROCESSES OF MIXTURE
FORMATION OF FUEL AND OXIDIZER IN STABILIZER-TYPE
BURNERS**

***Анотація.** Виконано математичне моделювання процесів сумішоутворення в пальникових пристроях стабілізаторного типу. Представлено результати досліджень полів концентрацій метану при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря. Показано наявність суттєвої залежності рівнів концентрації метану від величини даного коефіцієнта.*

***Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, пальниковий пристрій, паливна суміш, сумішоутворення, коефіцієнт надлишку повітря.*

Summary. *Mathematical modeling of mixture formation processes in stabilizer-type burners is performed. The results of studies of methane concentration fields at different values of the excess air coefficient are presented. The presence of a significant dependence of methane concentration levels on the value of this coefficient is shown.*

Key words: *computer simulation, burner device, fuel mixture, mixture formation, excess air coefficient.*

Аналізу процесів переносу при мікрофакельному спалюванню палива приділяється значна увага [1-10]. Однак наявні дослідження не охоплюють в достатній мірі всіх питань, що є актуальними для розробки високоефективних пальникових пристроїв.

Дана робота присвячена комп'ютерному моделюванню процесів сумішоутворення в пальникових пристроях стабілізаторного типу.

Математична модель досліджуваного процесу включає систему диференціальних рівнянь у частинних похідних, яка в декартовій системі координат може бути представлена у вигляді:

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

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_K U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v}{Sc_K} + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial \rho_K}{\partial x_j}, \quad K=1,2 \dots N-1, \quad (3)$$

де - ρ густина середовища; U_j - компоненти вектора швидкості в напрямку x_j ; P – статичний тиск; x_j -декартова координата, $j = 1,2,3$;

τ_{ij} – компоненти тензора напружень

$$\tau_{ij} = 2(\mu + \mu_T)S_{ij} - \frac{2}{3} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial U_n}{\partial x_n} + \rho \cdot k \right] \delta_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right),$$

μ , μ_T – молекулярна та турбулентна динамічна в'язкість; S_{ij} – компоненти тензора швидкостей деформацій; δ_{ij} – Символ Кронекера; k – кінетична енергія турбулентних пульсацій; ρ_K – парціальна масова густина K -го компонента, $\rho_K = \rho \cdot w_K$; w_K – масова концентрація K -го компонента; Sc_K – число Шмідта K -го компонента, $Sc_K = \nu / D_K$, D_K – коефіцієнт дифузії K -го компонента; Sc_T – турбулентне число Шмідта, ν_T – турбулентна кінематична в'язкість; N – число компонентів суміші. У наведених рівняннях підсумовування проводиться за повторюючим індексом.

Для замикання системи рівнянь (1) - (3) застосовувалася k - ϵ модель турбулентності в модифікації RNG. Обґрунтування використання цієї моделі проводилося шляхом зіставлення результатів розрахунків із даними натурних експериментів.

Числова реалізація розглянутої задачі здійснювалася із застосуванням програмного комплексу Fluent. При цьому, зважаючи на регулярність розташування стабілізаторів у стабілізаторній решітці і газових отворів на стабілізаторах, при математичному моделюванні розглядався лише характерний елемент досліджуваної системи довжиною, що дорівнює довжині каналу, висотою $H/2$, що становить половину кроку між стабілізаторами і глибиною $S/2$, що дорівнює половині кроку між газоподаючими отворами.

На обмежуючих поверхнях виділеного характерного елемента приймалися такі граничні умови. У вхідному перерізі задавалася швидкість повітря U_{BX}^{Π} і його ступінь турбулентності Tu_{BX}^{Π} . У поперечному перерізі газоподаючого отвору на бічній стінці стабілізатора заданими були швидкість газу V_{BX}^{Γ} і ступінь турбулентності Tu_{BX}^{Γ} . На іншій поверхні стінок стабілізатора приймалися умови прилипання та непроникності. На бічних поверхнях виділеного елемента задавалися умови симетрії, а в його

вихідному перерізі – «м'які» граничні умови, що відповідають рівності нулю похідних по нормалі до границі від залежних змінних.

Перейдемо до розгляду результатів математичного моделювання процесу сумішоутворення в пальниковому пристрої при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря α . На рис. 1 як приклад представлені дані, що відповідають $\alpha = 1,0$ і $\alpha = 1,35$. Варіювання величини α здійснювалося за рахунок зміни швидкості природного газу в газоподавальних отворах при незмінному значенні швидкості повітря на вході в пальниковий пристрій.

З рис. 1 видно, що зона з надлишком природного газу при $\alpha = 1,0$ помітно перевищує за розміром відповідну зону, яка відповідає $\alpha = 1,35$ у всіх перерізах $x = \text{const}$. Це, як очевидно, зумовлено зростанням витрати газу зі зменшенням величини α . Зауважимо також, що вказані зони з надлишковим вмістом природного газу для двох порівнюваних ситуацій дещо відрізняються і за своїм місцезнаходженням. Зокрема, при $\alpha = 1,0$ ця зона більшою мірою віддалена від стінки каналу, де знаходяться газоподавальні отвори. Ця обставина пов'язана зі зростанням далекобійності струменів газу при зниженні коефіцієнта α . Слід зазначити також, що змикання зон з надлишком природного газу в суміжних струменях відбувається для $\alpha = 1,0$ на менших відстанях від гирла струменів, ніж при $\alpha = 1,35$.

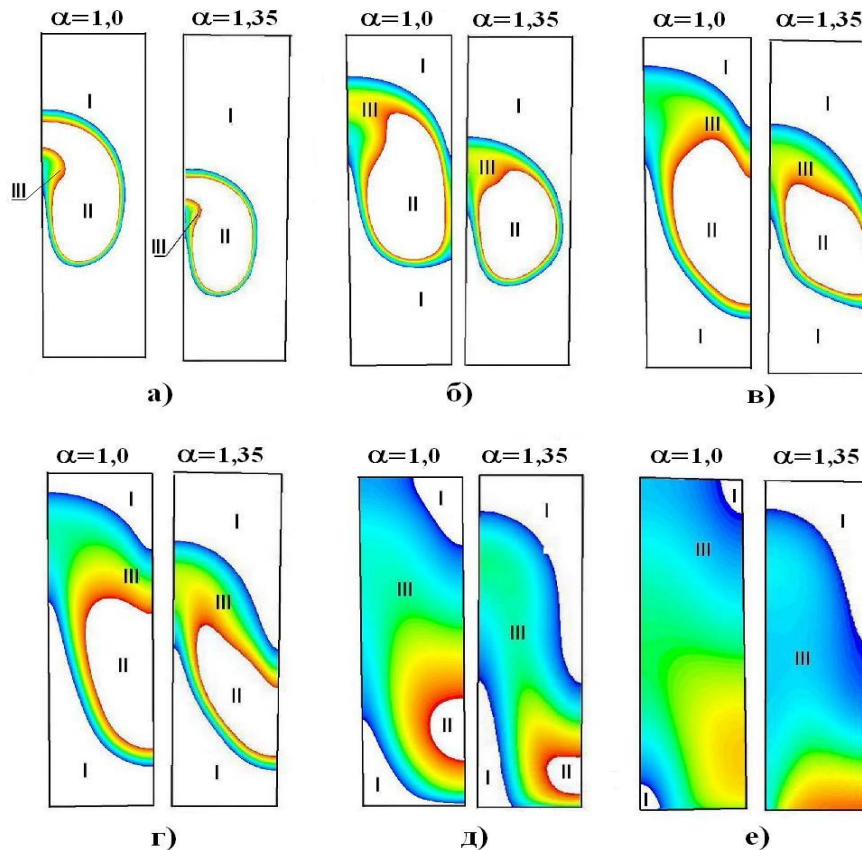


Рис. 1. Поля об'ємної концентрації метану в поперечних перерізах $x = \text{const}$, що проходять через затуплену задню кромку стабілізатора:

а) $x = -0,11$ м; б) $-0,1$; в) $-0,09$; г) $-0,08$; д) $-0,04$; е) 0

Щодо зони, в якій паливоповітряна суміш знаходиться в концентраційних межах займання, то, як видно з рис. 1, у всіх перерізах $x = \text{const}$ дана зона є більшою за величиною у випадку $\alpha = 1$. При цьому зазначена зона більшою мірою віддалена від поверхні розташування газоповальничих отворів у порівнянні з зоною, що відповідає $\alpha = 1,35$. У перерізі $x = \text{const}$, що проходить через затуплену задню кромку стабілізатора, зона з відповідним сумішоутворенням охоплює практично весь переріз каналу для $\alpha = 1$. У ситуації, коли $\alpha = 1,35$, значна частина цього перерізу є зайнятою зоною з надлишковим вмістом повітря, віддаленою від площини знаходження газоподавельних отворів. Така картина розташування розглянутих зон зумовлена зниженням витрати природного газу і далекобійності газових струменів зі зменшенням величини α .

Слід також звернути увагу на особливості полів концентрацій метану в закормовій області стабілізатора. Як видно з наведених даних (рис.1 е), в цій області рівні концентрацій метану є суттєво вищими при $\alpha = 1,35$, що також є наслідком зазначеного вище зниження далекобійності газових струменів при збільшенні коефіцієнта надлишку повітря.

Отримані поля об'ємної концентрації метану в поперечних перерізах пальника та їх розташування відповідають фізичній зміні витрат газу і, як наслідок, зниженню далекобійності газових струменів.

Література

1. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Альошко С.О., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Тимощенко О.Б., Абдулін М.З., Бутовський Л.С. Аналіз ефективності систем охолодження стабілізаторних пальникових пристроїв з направляючими дефлекторами. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація*. 2013. 758. С. 46-51.

2. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Альошко С.О., Шеренковський 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.

3. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В. Meranova N.O., Alioshko S.A., Rokytko K.V. Особливості течії і сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях з асиметричним паливорозподіленням. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т. 41, 1. С. 11-19. <https://doi.org/10.31472/tpre.1.2019.2>.

4. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В. и др. Математическое моделирование взаимодействия вихревых структур в прямоугольной нише. *Восточно-европейский журнал передовых*

технологий. 2014. Т. 3, № 8 (69). С. 40-44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24895>.

5. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E. et set. 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>.

6. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В, Прокопов В.Г., Полозенко Н.П. и др. 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>.

7. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju.V., Aleshko S.A. et set. 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.

8. 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/tpe.2.2023.4>.

9. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алёшко С.А., Абдулин М.З. и др. 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>.

10. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О. та ін. 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>.