

УДК 536.24:533

CFD МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ЗОНИ ГОРІННЯ ПАЛЬНИКІВ СТАБІЛІЗАТОРНОГО ТИПУ З АСИМЕТРИЧНОЮ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА

Фіалко Н.М., член-кореспондент НАН України, Прокопов В.Г., докт.техн.наук,
Шеренковський Ю.В., канд. техн. наук, Альошко С.О., канд. техн. наук,
Меранова Н.О., канд. техн. наук, Рокитько К.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.2>

Представлено результати комп'ютерного моделювання теплового стану зони горіння та інтенсивності вигорання палива для стабілізаторних пальників з асиметричним паливорозподіленням. Виявлено особливості полів температури в даній зоні, характерні для двохстадійного горіння паливного газу.

Представлены результаты компьютерного моделирования теплового состояния зоны горения и интенсивности выгорания топлива для стабилизаторных горелок с асимметричным топливораспределением. Выявлены особенности полей температуры в данной зоне, характерные для двухстадийного горения топливного газа.

The results of computer simulation of the heat state of the combustion zone and the fuel burnup rate for stabilizer burners with asymmetric fuel distribution are presented. The features of temperature fields in this zone that are characteristic of two-stage combustion of fuel gas are revealed.

Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: пальникові пристрої, тепловий стан, асиметрична подача палива, CFD моделювання.

a – коефіцієнт температуропровідності;
 D_k – коефіцієнт дифузії k -ої компоненти;
 h – ентальпія;
 M_k – молекулярна маса k -ої компоненти;
 N^* – кількість компонент суміші;
 P – статичний тиск;
 Pr, Pr_t – молекулярне і турбулентне число Прандтля,
 $Pr = \nu/a$;
 q_h – джереловий член, який враховує теплоту хімічних реакцій і перенос теплоти випромінюванням;
 R – універсальна газова стала;
 R_k – джереловий член, який враховує швидкість утворення k -ої компоненти;
 Sc_k – число Шмідта k -го компонента, $Sc_k = \frac{\nu}{D_k}$;
 Sc_t – турбулентне число Шмідта;

t – температура;
 T – абсолютна температура;
 U_j – компоненти вектору швидкості в напрямку x_j ;
 W_k – масова концентрація k -ої компоненти;
 x_j – декартова координата, $j = 1, 2, 3$;
 α – коефіцієнт надлишку повітря;
 λ – коефіцієнт теплопровідності;
 μ, μ_t – молекулярна і турбулентна динамічна в'язкість;
 ν – кінематична в'язкість;
 ν_t – турбулентна кінематична в'язкість;
 ρ – густина;
 ρ_k – парціальна масова густина k -ої компоненти,
 $\rho_k = \rho \cdot W_k$;
 τ_{ij} – компоненти тензора напруження.

Вступ

Задачі підвищення ефективності пальникових пристроїв стабілізаторного типу потребують проведення поглиблених досліджень їх робочих процесів [1 - 10]. Особливий інтерес становлять дослідження температурних режимів зони горіння цих пристроїв. Від вказаних режимів значною мірою залежить перебіг таких процесів, як утворення токсичних речовин (насамперед, оксидів азоту), вигорання палива та ін., які визначають енергетичні і екологічні характеристики пальникових пристроїв.

Дана стаття присвячена моделюванню теплового стану зони горіння стабілізаторних пальників з асиметричною подачею палива. Ця модифікація пальникових пристроїв орієнтована на застосування в умовах відносно високих значень коефіцієнта надлишку повітря. Особливості запропонованої модифікації полягають у можливості реалізувати двохстадійне спалювання палива, регулювати частками первинного і вторинного повітря, що подається на горіння, здійснювати вибір місця подачі вторинного повітря тощо.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає в аналізі особливостей температурних режимів зони горіння паликових пристроїв з асиметричною подачею палива. Певна увага в роботі приділяється також розгляду процесу вигорання палива у досліджуваних умовах.

Модуль досліджуваного паликового пристрою, розміщений в каналі 1, складається з двох плоских стабілізаторів полум'я 2 (рис. 1). На одній з бічних поверхонь кожного стабілізатора, що обтікається первинним повітрям, розташована система газоподавальних отворів 3, через які струмені паливного газу подаються зануренням у зносячий потік окисника. Вторинне повітря надходить у міжстабілізаторний канал і подається на горіння нижче за потоком після обтікання закрилків 4.

Математична модель досліджуваного процесу горіння паливного газу має вигляд:

рівняння руху

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

рівняння неперервності

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

рівняння енергії для реагуючих турбулентних потоків у формі рівняння переносу ентальпії

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + q_h, \quad (3)$$

рівняння збереження маси компонент реагуючої суміші

$$\frac{\partial(\rho_k U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v}{Sc_k} + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial \rho_k}{\partial x_j} \right] + R_k, \quad (4)$$

$k=1,2,\dots,N^*-1,$

рівняння стану для багатокомпонентної суміші

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T \sum_k \frac{W_k}{M_k}}, \quad (5)$$

рівняння теплопровідності для стінок стабілізатора

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{dt}{dx_j} \right) = 0. \quad (6)$$

У наведеній моделі підсумовування відбувається за повторюваним індексом j .

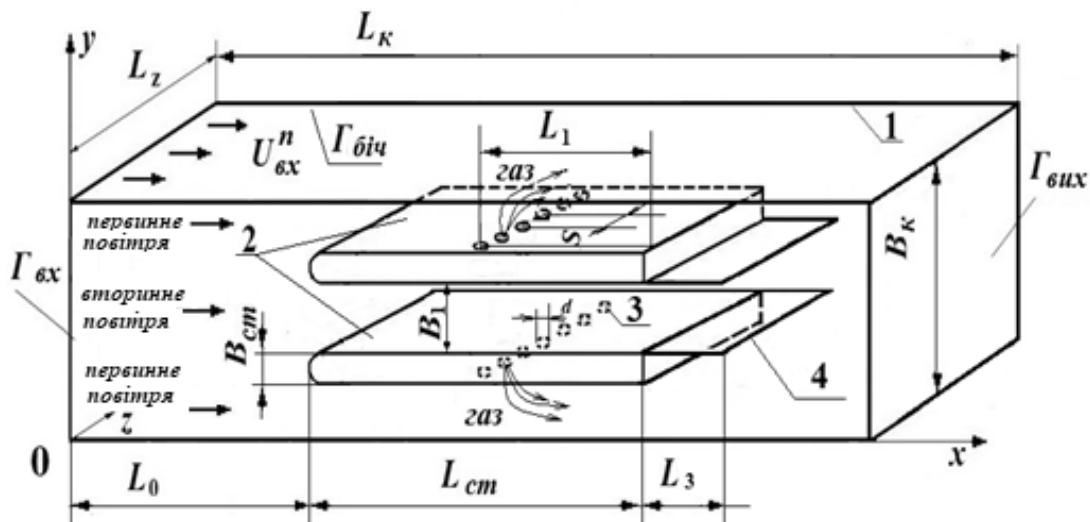


Рис. 1. Схема мікрофакельного паликового пристрою стабілізаторного типу з асиметричною подачею палива: 1 – плоский канал; 2 – стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; 4 – закрилки.

Наведена задача (1)-(6) розв'язувалася з застосуванням програмного пакету FLUENT. Моделювання здійснювалось на основі підходу DES (Detached Eddy Simulation – моделювання відокремлених вихорів), який є гібридним підходом з переключенням у різних просторових зонах методів RANS і LES (Reynolds Averaged Navier-Stokes – метод, що базується на осереднених за Рейнольдсом стаціонарних рівняннях Нав'є-Стокса, і Large Eddy Simulation – метод моделювання крупних вихорів).

Наведені нижче результати розрахунків відповідають таким вихідним даним: $B_{ст} = 0,015$ м; $B_1 = 0,018$ м; $B_k = 0,075$ м; $L_k = 1,3$ м; $L_0 = 0,1$ м; $L_{cm} = 0,2$ м; $L_1 = 0,02$ м; $L_3 = 0,09$ м; $d = 0,002$ м; $S/d = 3,5$; коефіцієнт загромодження прохідного перерізу каналу $k_f = 0,4$; швидкість повітря на вході в канал $U_{вх}^n = 10,0$ м/с; коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 3,0$.

Результати досліджень та їх аналіз

Характеризуючи в цілому температурний режим зони горіння досліджуваного пального пристрою, насамперед, слід відзначити суттєву просторову нерівномірність розподілу температури в даній зоні. Рисунок 2 ілюструє профілі температури в поперечних перерізах каналу при різних значеннях поздовжньої координати x у площині, що проходить через вісь газоподавальних отворів. (Значення координати x відраховується від торця стабілізатора полум'я вниз за потоком, координати y – від площини симетрії модуля, що проходить через середину міжстабілізаторного каналу).

Як видно з рис. 2, поблизу торця стабілізатора полум'я, при $x \leq 0,4$ м, на профілях температури може бути виділена центральна частина – зона високих температур, що відповідає розташуванню стабілізатора, та дві периферійні зони, на границях яких рівень температури близький до температури повітря на вході в канал. Нижче за потоком температура у вказаній центральній зоні поступово знижується, дещо зростаючи у периферійних зонах. При подальшому збільшенні координати x ($x \geq 0,8$ м) межі зазначених зон розмиваються і профілі температури все більше наближаються до рівномірних.

Звертає на себе увагу також факт асиметрії температурних профілів відносно осі симетрії стабілізатора полум'я. А саме, поблизу стабілізатора полум'я, при $x \leq 0,4$ м, ці профілі є суттєво менш заповненими в зонах, що відповідають подачі вторинного повітря. Вказана асиметрія, очевидно, пов'язана з асиметрією паливоподачі і двостадійністю процесу горіння.

Інтегральною характеристикою нерівномірності розподілу температури у поперечних перерізах каналу слугує коефіцієнт відносної нерівномірності поля температури γ , що визначається залежністю

$$\gamma = \frac{T_{max} - \bar{T}}{\bar{T} - T_{вх}}$$

де T_{max} , \bar{T} – максимальна і середньомасова температура в даному поперечному перерізі каналу $x = \text{const}$; $T_{вх}$ – температура повітря на вході в канал.

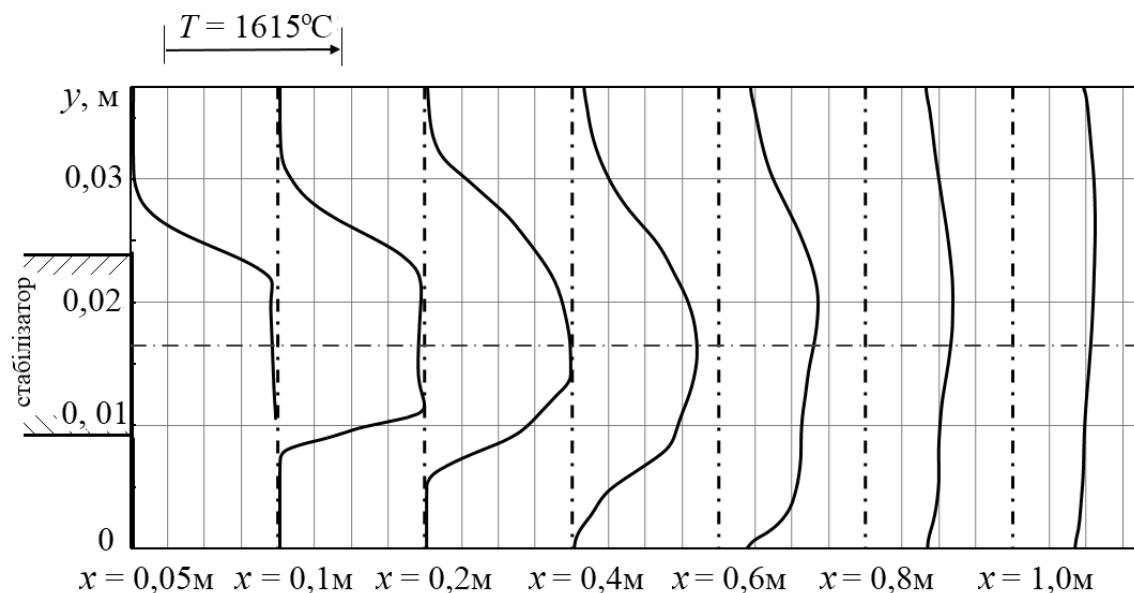


Рис. 2. Профілі температури в поперечних перерізах каналу при різних значеннях поздовжньої координати x у площині, що проходить через вісь газоподавальних отворів.

Згідно з одержаними даними, в області розташування закрилка вказана нерівномірність розподілу температури різко знижується (рис. 3). Далі на значній ділянці за закрилком ($0,1 \text{ м} \leq x \leq 0,6 \text{ м}$) темп зменшення нерівномірності поля температур у поперечних перерізах каналу залишається практично незмінним. При подальшому віддаленні від торця стабілізатора вказана нерівномірність асимптотично зменшується.

Розподіл середньомасової температури \bar{T} по довжині каналу наведено на рис. 4. Як свідчать одержані дані, в зоні розташування закрилка ($x \leq 0,9 \text{ м}$) має місце інтенсивне зростання температури за потоком. Це зумовлено тим, що горіння в даній зоні відбувається за наявності лише пер-

винного повітря, тобто при відносно низьких значеннях коефіцієнту надлишку повітря α . Різке зниження темпу зростання температури по довжині потоку за закрилком пов'язано з надходженням холодного вторинного повітря.

Дані на рис. 3 ілюструють зміну коефіцієнта повноти вигорання палива η по довжині каналу. Як видно, характер поведінки η корелюється з поздовжнім розподілом середньомасової температури (див. рис. 4). Згідно з наведеними даними горіння протікає вельми інтенсивно на першій стадії при $x < L_3$. Швидкість вигорання палива суттєво зменшується при подачі вторинного повітря за закрилком. На ділянці догорання у хвості факела темп вигорання надалі зменшується.

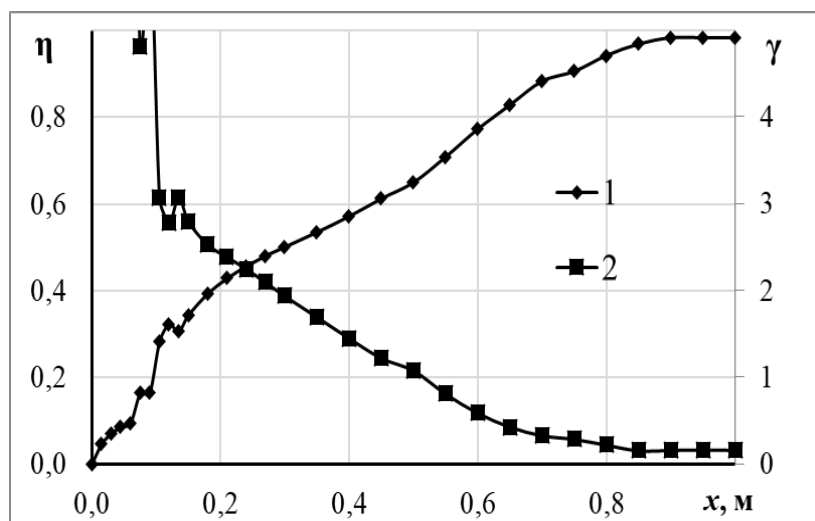


Рис. 3. Зміна коефіцієнта повноти вигорання палива η (1) та коефіцієнта відносної нерівномірності поля температури (2) по довжині каналу.

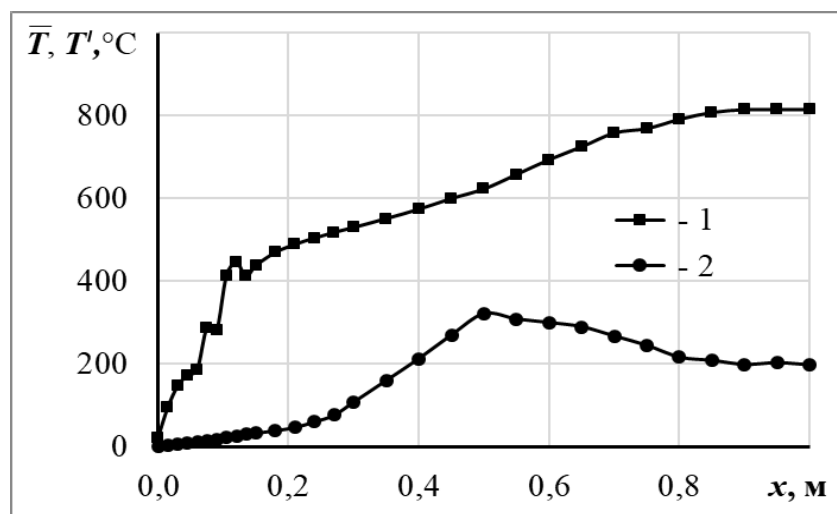


Рис. 4. Розподіл середньомасової температури \bar{T} (1) та середньоквадратичних пульсацій температури T' (2) по довжині каналу.

Висновки

На основі комп'ютерного моделювання досліджено характеристики температурних режимів зон горіння процесів вигорання палив в стабілізаторних пальниках з асиметричною подачею паливного газу. Показано, що паливоподача лише з однієї із бічних поверхонь стабілізаторів полум'я зумовлює ряд особливостей теплового стану зони горіння, таких як асиметрія профілів температури, більш інтенсивне вигорання палива на першій стадії горіння, що відповідає надходженню тільки первинного повітря, тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Полозенко Н.П., Клиш 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. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24895>.
2. Фіалко Н.М., Шеренковський 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: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39193>.
3. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Rezagui 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. [dx.doi.org/10.29019/084.3](https://doi.org/10.29019/084.3)
4. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О. Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Полозенко Н.П., Клиш А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. 24 (5). С. 136-142. ISBN 5-7763-2435-1.
5. Фіалко Н.М., Бутовський Л.С., Прокопов В.Г., Грановская Е.А. Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Коханенко П.С. Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком. Промышленная теплотехника, 2010. №5. С. 28-36. ISSN 0204-3602.
6. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Тимощенко А.Б., Абдулін М.З., Малецкая О.Е., Ночовный А.В. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. Промышленная теплотехника. 2012. № 1. С. 72-76. ISSN 0204-3602.
7. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Абдулін 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>
8. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Миргородський А.Н. Компьютерное моделирование процессов переноса в системах охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа. Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 64-71. ISSN 0204-3602.
9. Fialko N.M., Meranova N.O., Shrenkovskii Ju.V., Aleshko S.A., Rokytko K.V. 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. 19-20 October. 2018. P. 116-120. ISBN 978-9934-571-55-8.
10. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Рокитько К.В. Особливості течії і сумішоутворення в мікрофакельних пальникових пристроях з асиметричним паливорозподіленням. Промышленная теплотехника. 2019. № 1. С. 11-19. <https://doi.org/10.31472/tpre.1.2019.2>.

CFD SIMULATION OF TEMPERATURE REGIMES OF THE COMBUSTION ZONE OF STABILIZER-TYPE BURNERS WITH ASYMMETRIC FUEL SUPPLY

Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Alioshko S.O., Meranova N.O., Rokytko K.V.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.2>

The results of computer simulation of the heat state of the combustion zone and the burnup rate of fuel for stabilizer burners with asymmetric fuel distribution are presented. The features of temperature fields in this zone that are characteristic of the conditions under study are revealed. The analysis of these features in the aspect of their conditionality by the two-stage combustion of fuel gas is carried out.

References 10, figures 4.

Key words: burners, heat state, asymmetric fuel supply, CFD simulation.

1. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Mayson N.V., Meranova N.O., Butovskiy L.S., Abdulin M.Z., Polozenko N.P., Klishch A.V., Stryzheus S.N., Timoshchenko A.B.* [Mathematical modeling of processes of flow and mixture formation in a cylindrical stabilizer burner device]. [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2014. V.3. № 8 (69). P. 40-44. ISSN 1729-3774. :<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24895>. in (Rus.)

2. *Fialko, N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Prokopov V.G., Polozenko N.P., Meranova N.O., Aleshko S.A., Ivanenko G.V., Yurchuk V.L., Milko E.I., Olkhovskaya N.N.* [Modeling of the flow structure in the echelonized gratings of stabilizers with a different step of their displacement]. [Eastern European Journal of Advanced Technology]. 2015. V.2. № 8 (74). P.29-34. ISSN 1729-3774. :<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39193>. in (Rus.)

3. *Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Rezagui A., Donchak M.I., Evtushenko A.A.* [Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply]. [Technological Systems], 2018. 3(38). C. 37-43. (Eng). [dx.doi.org/10.29019/084.3](https://doi.org/10.29019/084.3) in (Rus.)

4. *Fialko, N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Mayson N.V., Meranova N.O., Butovskiy L.S., Abdulin M.Z., Polozenko N.P., Klishch A.V., Stryzheus S.N., Timoshchenko A.B.* [Intensification of transport processes in a burner device with a cylindrical flame stabilizer]. [Scientific Bulletin of UNFU]. 2014. 24 (5). P. 136-142. ISBN 5-7763-2435-1. in (Rus.)

5. *Fialko N.M., Butovskiy L.S., Prokopov V.G., Granovskaya E.A., Sherenkovskiy Ju.V., Aleshko S.A., Kokhanenko P.S.* Features of flow around flat stabilizers by a limited flow Industrial Heat Engineering. 2010. №5. P. 28-36. (Rus). ISSN 0204-3602.

6. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko S.A., Polozenko N.P., Timoshchenko A.B., Abdulin M.Z., Maletskaya O.E., Nochovny A.V.* [Analysis of the influence geometric shape of the niche cavity on the aerodynamic resistance of the channel]. [Industrial Heat Engineering]. 2012. № 1. P. 72-76. ISSN 0204-3602. in (Rus.)

7. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Alioshko S.A., Abdulin M.Z., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Olkhovskaya N.N., Rezagui A., Evtushenko A.A.* [Computer simulation of flow in microjet burner devices with asymmetric supply of fuel]. [Scientific Bulletin of UNFU]. 2018. Vol. 28. № 8. C 117-121. (Rus). <https://doi.org/10.15421/40280823> in (Rus.)

8. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Ju.V., Alioshko S.A., Meranova N.O., Abdulin M.Z., Butovskiy L.S., Mirgorodskiy A.N.* [Computer simulation of transfer processes in cooling systems of burner devices of stabilizer type]. [Industrial Heat Engineering]. 2012. №1. P. 64-71. (Rus). ISSN 0204-3602. in (Rus.)

9. *Fialko N.M., Meranova N.O., Sherenkovskiy Ju.V., Aleshko S.A., Rokytko K.V.* 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. 19-20 October. 2018. P. 116-120. ISBN 978-9934-571-55-8. (in Eng).

10. *Fialko N.M., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Alioshko S.A., Rokytko K.V.* Peculiarities of flow and mixture formation in microjet burner devices with asymmetric fuel distribution. Industrial Heat Engineering. 2011. № 1. P.51-56. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.2>. (in Ukr.)

Отримано 02.11.2019

Received 02.11.2019