



**Н. М. Фіалко¹, В. Г. Прокопов¹, С. А. Алешко¹, М. З. Абдулін^{1,2}, К. В. Рокитько¹,
О. Е. Малецька¹, Е. І. Милко¹, Н. Н. Ольховська¹, А. Реграгі¹, А. А. Евтушенко¹**

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, г. Київ, Україна

² Национальный технический ун-тет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", г. Киев, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ С АСИММЕТРИЧНОЙ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА

Вывявлены основные закономерности изотермического течения топлива и окислителя в микрофакельном горелочном устройстве с односторонней подачей топлива. Получены данные компьютерного моделирования с использованием подхода DES (Detached Eddy Simulation), представляющего собой комбинацию моделей RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) и LES (Large Eddy Simulation) в разных областях пространства. Установлены эффекты влияния длины закрылка, расположенного на торцевой поверхности стабилизаторов пламени, на различные характеристики течения. Показано, что наличие закрылков приводит к существенному изменению вихревой структуры в следе за стабилизаторами. Оценено влияние длины закрылков на такие параметры течения, как протяженность зоны обратных токов в закормовой области стабилизаторов пламени, уровень среднеквадратичных пульсаций скорости в данных зонах и пр. Установлено, что с увеличением длины закрылков существенно возрастает протяженность зоны обратных токов за стабилизатором. Выявлено также, что чем короче закрылки, тем больше превышает их длину протяженность зоны обратных токов. Выполнен анализ пространственного распределения пульсаций скорости в рассматриваемом горелочном устройстве при наличии и отсутствии закрылков на торцевых поверхностях стабилизаторов пламени. Показано, что наиболее высокий уровень данных пульсаций наблюдается вблизи границы зоны обратных токов, удаленной от торца стабилизатора. Установлено, что уровень среднеквадратичных пульсаций скорости является наиболее высоким в условиях отсутствия закрылка и снижается при увеличении его длины.

Ключевые слова: стабилизаторы пламени; односторонняя подача топлива; CFD моделирование; зона обратных токов; закрылки.

Введение. Знание закономерностей протекания рабочих процессов в микрофакельных горелочных устройствах различного типа необходимо для их совершенствования, разработки новых модификаций и пр. В качестве инструмента исследования данных процессов в различных горелочных устройствах в последний период широко применяется компьютерное моделирование (Fialko et al., 2014 a; Ravi, 2014; Fialko et al., 2011 a; Bagheri et al., 2014; Fialko et al., 2010; Subramanian, 2010; Fialko et al., 2015; Lawal et al., 2010; Warnatz et al., 2003; Fialko et al., 2011b; Wan et al., 2012; Fialko et al., 2014b; Carlssona et al., 2014; Snegirev et al., 2015). Это

связано, в частности с тем, что предсказания компьютерного моделирования становятся все более совершенными и, кроме того, позволяют получать детальную полевую информацию о различных характеристиках процесса.

В данном исследовании рассмотрено компьютерное моделирование изотермического течения топлива и окислителя в микрофакельных горелках с асимметричной подачей топлива. Рассмотрению подлежали горелочные устройства со струйным внедрением топлива в сносящий поток окислителя. При этом подача топлива осуществлялась лишь с одной из боковых поверхностей

Інформація про авторів:

Фіалко Наталія Михайлівна, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу.

Email: nmfialko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

Прокопов Віктор Григорович, д-р техн. наук, професор, пров. наук. співробітник. **Email:** nmfialko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-9026-8742>

Алешко Сергій Олександрович, канд. техн. наук, пров. наук. співробітник. **Email:** s_aleshko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0430-7144>

Абдулін Михайло Загреддинович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник; доцент, кафедра ТЕУ Т та АЕС.

Email: mzabdulin@gmail.com

Рокитько Костянтин Володимирович, мол. наук. співробітник. **Email:** kr.kicenergetik@gmail.com

Малецька Ольга Євгенівна, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник. **Email:** maletka@nas.gov.ua

Милко Євген Іванович, ст. наук. співробітник. **Email:** milko_1963@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-4687-0998>

Ольховська Ніна Миколаївна, наук. співробітник. **Email:** Olchovska_Nina@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-7903-7225>

Реграгі Абубакр, мол. наук. співробітник. **Email:** regrab@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5183-410X>

Евтушенко Артем Олександрович, мол. наук. співробітник. **Email:** egda@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Алешко С. А. и др. Компьютерное моделирование течения в микрофакельных горелочных устройствах с асимметричной подачей топлива. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 8. С. 117–121.

Citation APA: Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Alioshko, S. A., et al. (2018). Computer simulation of flow in microjet burner devices with asymmetric supply of fuel. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(8), 117–121. <https://doi.org/10.15421/40280823>

стабилизаторов пламени. Указанные горелочные устройства ориентированы на эксплуатацию в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха от 2,0 до 3,0. Такие условия характерны для горелок, устанавливаемых в промышленных печах, сушилках и пр.

Постановка задачи и методика проведения исследований. Модуль предлагаемого горелочного устройства состоит из двух плоских стабилизаторов, расположенных в канале на некотором расстоянии друг от друга (рис. 1). Струйная подача топлива в каждом из стабилизаторов осуществляется через систему круглых отверстий, расположенных на его боковой поверхности. Стабилизаторы снабжены плоскими закрывками, установленными на их торцевых поверхностях. Основные функции данных закрывок состоят, во-первых, в содействии образованию устойчивых зон обратных токов в закормовой области стабилизатора и, во-вторых, в формировании потока воздуха, призванного снизить температуру в центральной части зоны активного горения. Что касается указанного снижения, то оно является весьма важным в плане обеспечения высокой экологической эффективности рассматриваемого горелочного устройства. Следует также отметить, что поток холодного воздуха, текущий между двумя закрывками, служит целям их охлаждения.

Исследования проводились на основе CFD моделирования с использованием программного пакета FLUENT. При этом применялся метод DES (Detached Eddy Simulation – метод моделирования отсоединенных вихрей), представляющий собой гибридный подход, в котором осуществляется переключение моделей RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes – полуэмпирический метод, базирующийся на осредненных по Рейнольдсу стационарных уравнениях Навье-Стокса) и LES (Large Eddy Simulation – метод моделирования крупных вихрей) в разных областях пространства (Volkov & Emelyanov, 2008).

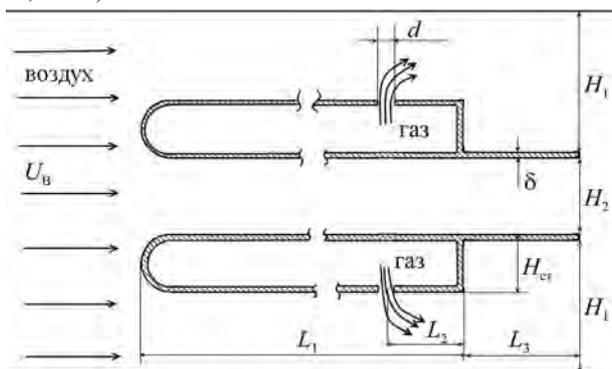


Рис. 1. Схема микрофакельного горелочного устройства стабилизаторного типа с односторонней подачей топлива: 1) плоский канал; 2) стабилизаторы пламени; 3) газоподающие отверстия; 4) закрывки

Приведенные ниже результаты компьютерного моделирования отвечают следующим исходным данным: $d = 0,003$ м; $S/d = 4,0$; $H_{CT} = 0,015$ м; $H_1 = 0,04$ м; $H_2 = 0,02$ м; $L_1 = 0,2$ м; $L_2 = 0,02$ м; $\delta = 0,0015$ м, $U_B = 10,0$ м/с, $\alpha = 3,0$; рассматривались ситуации, отвечающие отсутствию закрывки $L_3 = 0$ и его наличию при $L_3 = 0,015$; $0,03$; $0,045$ и $0,06$ м.

Анализ результатов исследований. При анализе результатов компьютерного моделирования особое внимание уделялось рассмотрению закономерностей влияния длины закрывки L_3 на характеристики течения

топлива и окислителя. Как следует из данных, приведенных на рис. 2, картина течения в закормовой области стабилизатора с закрывками и без него является существенно различной. А именно, при отсутствии закрывки за стабилизатором наблюдается два основных вихря. В ситуации же с закрывкой ярко выраженным является лишь один вихрь, центр которого смещается вниз по потоку с увеличением длины закрывки. При этом за торцом закрывки формируется вихрь небольших размеров, а в угловой зоне за стабилизатором – вторичный вихрь.

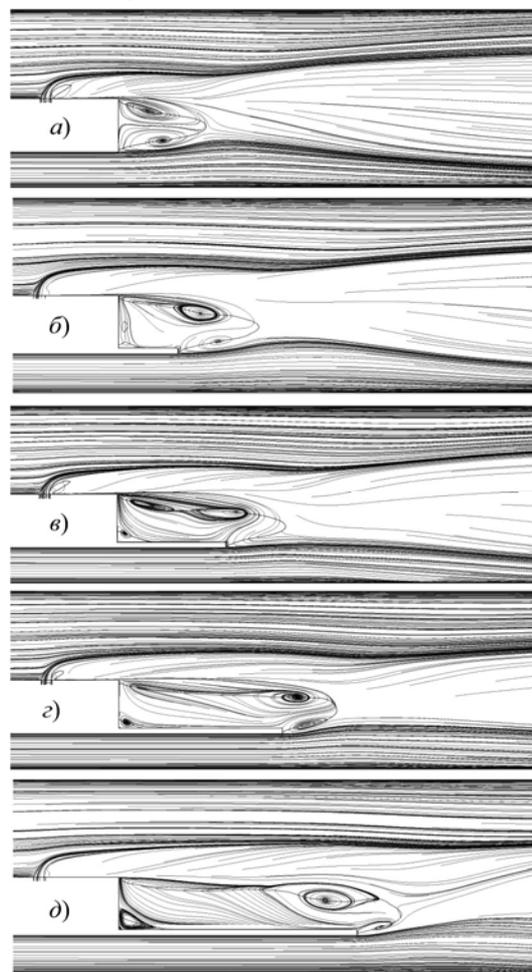


Рис. 2. Картина линий тока топлива и окислителя в продольном сечении стабилизатора, проходящем через ось газоподающих отверстий при различных значениях длины закрывки: а) $L_3 = 0$; б) $L_3 = 0,015$ м; в) $L_3 = 0,03$ м; г) $L_3 = 0,045$ м; д) $L_3 = 0,06$ м

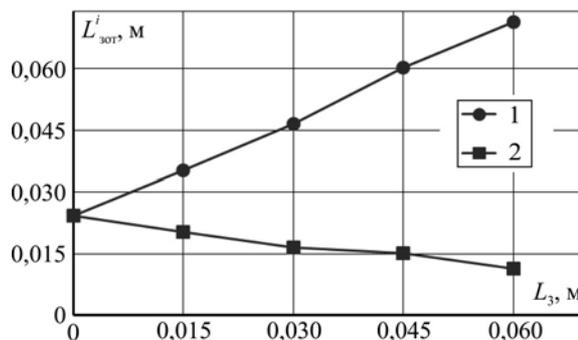


Рис. 3. Зависимость от длины закрывки L_3 : 1) протяженности зоны обратных токов L_{3OT}^1 ; 2) величины L_{3OT}^2 , на которую протяженность зоны обратных токов превышает длину закрывки

Что касается протяженности зоны обратных токов L_{3OT} за стабилизатором, то она значительно увеличивается

ется с ростом длины закрылка (рис. 3). Так, $L_{3OT}^1 = 24,2$ мм при $L_3 = 0$ и составляет 71,3 мм при $L_3 = 60$ мм. Следует отметить, что протяженность зоны обратных токов L_{3OT}^1 превышает длину закрылка при всех значениях L_3 . При этом данное превышение L_{3OT}^2 уменьшается с увеличением L_3 .

Рис. 4 иллюстрирует распределение продольной составляющей вектора скорости в закормовой области стабилизатора вдоль его оси при разных значениях длины закрылка. Как видно, при отсутствии закрылка максимальное по абсолютной величине значение скорости U_x^{max} в зоне обратных токов имеет место примерно посередине ее длины. В случае же стабилизатора с закрылкой местоположение скорости U_x^{max} смещается вниз по течению ближе к границе зоны обратных токов. При этом данное смещение оказывается тем более значительным, чем длиннее закрылка. Обращает на себя внимание также тот факт, что при наличии закрылка непосредственно вблизи стабилизатора наблюдается область с пониженными по абсолютной величине значениями скорости U_x . Причем протяженность данных областей возрастает с увеличением длины закрылка.

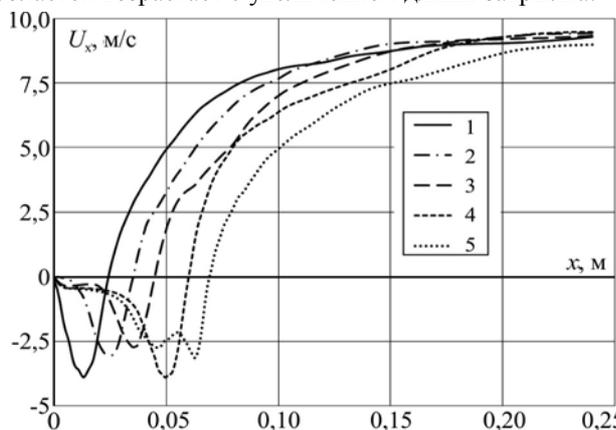


Рис. 4. Распределение скорости U_x в закормовой области стабилизатора вдоль его продольной оси при различных значениях длины закрылка: 1 – $L_3 = 0$; 2 – $L_3 = 0,015$ м; 3 – $L_3 = 0,03$ м; 4 – $L_3 = 0,045$ м; 5 – $L_3 = 0,06$ м

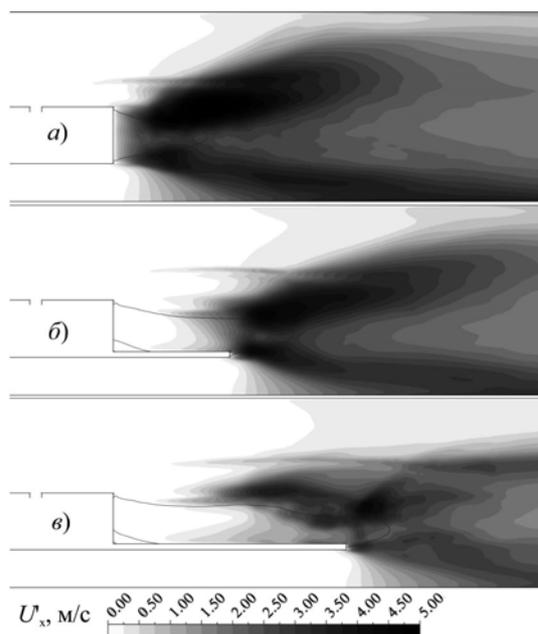


Рис. 5. Поля среднеквадратичных пульсаций скорости U'_x в продольном сечении стабилизатора, проходящем через ось га-

зоподающих отверстий, при различных значениях длины закрылка: а) $L_3 = 0$; б) $L_3 = 0,03$ м; в) $L_3 = 0,06$ м

Анализ полей среднеквадратичных пульсаций скорости U'_x для рассматриваемых физических ситуаций свидетельствует о том, что наибольшие значения данных пульсаций имеют место в закормовой области стабилизатора (рис. 5). При этом подобласти, отвечающие указанным наибольшим значениям, вытянуты вниз по потоку и располагаются вблизи, удаленной от торца стабилизатора, границы циркуляционной зоны. Что касается уровня среднеквадратичных пульсаций скорости U'_x , то в целом он оказывается наиболее высоким при отсутствии закрылка и уменьшается с увеличением его длины.

Выводы. На основе компьютерного моделирования выполнены исследования закономерностей изотермического течения топлива и окислителя в микрофакельном горелочном устройстве с асимметричной струйной подачей топлива в сносящий поток окислителя. Получены данные об эффектах влияния длины закрылок, расположенных на торцевых поверхностях стабилизаторов, на различные характеристики течения. Показано, что наличие данных закрылок приводит к существенному изменению картины течения в закормовой области стабилизатора, обуславливая формирование более сложных вихревых структур. Установлено, что с увеличением длины закрылок значительно возрастает протяженность зоны обратных токов за стабилизатором и изменяется характер распределения скоростей в данной зоне. Показано, что максимальные пульсации продольной составляющей скорости в зонах обратных токов имеют место в случае стабилизаторов без закрылок. При увеличении длины закрылок уровень данных пульсаций снижается.

Перспективы дальнейших исследований состоят, прежде всего, в анализе структуры течения в рассматриваемых горелочных устройствах в условиях реагирующих потоков. Кроме того, значительный интерес представляет изучение закономерностей смесеобразования топлива и окислителя, а также выгорания топлива и формирования полей температуры в зоне горения.

Перелік використаних джерел

- Bagheri, G., Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2014). Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-combustion of hydrogen-air mixture. *Applied Thermal Engineering*, 67, 26–27. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.040>
- Carlssona, H., Nordströmb, E., Bohlinb, A., Peterssonb, P., Wua, Y., Collinb, R., Aldénb, M., Bengtssonb, P.-E., & Baia, X.-S. (2014). Large eddy simulations and rotational CARS/PIV/PLIF measurements of a lean premixed low swirl stabilized flame. *Combustion and Flame*, 161(10), 2539–2551. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.03.017>
- Fialko, N. M., Butovskii, L. S., Prokopov, V. G., Sherenkovskii, Ju. V., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., & Polozenko, N. P. (2011). Компьютерное моделирование протесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа в недвигательный поток воздуха. [Computer simulation of the process of mixture formation in burner devices of the stabilizer type with gas introduction of gas into the blowing air flow]. *Industrial Heat Engineering*, 33(1), 51–56. [In Russian].
- Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Butovskii, L. S., Sherenkovskii, Ju. V., Aleshko, S. A., Meranova, N. O., & Polozenko, N. P. (2011). Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени. [Peculiarities of the flow of fuel

- and oxidizer at the layered arrangement of flame stabilizers]. *Industrial Heat Engineering*, 33(2), 59–64. [In Russian].
- Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Butovskii, L. S., Sherenkovskii, Ju. V., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., Kokhanenko, P. S., & Polozenko, N. P. (2010). Modelirovanie struktury techeniia izotermicheskogo potoka v eshelonirovannoi reshetke ploskikh stabilizatorov plameni. [Modeling of the structure of an isothermal flow in an echeloned lattice of flat flame stabilizers]. *Industrial Heat Engineering*, 32(6), 28–36. [In Russian].
- Fialko, N. M., Sherenkovskii, Ju. V., Prokopov, V. G., Polozenko, N. P., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., Ivanenko, G. V., Yurchuk, V. L., Milko, E. I., & Olkhovskaia, N. N. (2015). Modelirovanie struktury techeniia v eshelonirovannykh reshetkakh stabilizatorov pri varirovanii shaga ikh smeshcheniia. [Modeling of the flow structure in echeloned grids of stabilizers by varying their displacement step]. (Vol. 2). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 8(74), 29–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39193>
- Fialko, N. M., Sherenkovskii, Ju. V., Mayson, N. V., Meranova, N. O., Abdulin, M. Z., Butovskii, L. S., Polozenko, N. P., Klishch, A. V., Stryzheus, S. N., & Timoshchenko, A. B. (2014). Matematicheskoe modelirovanie protsessov techeniia i smeseobrazovaniia v tsilindricheskom stabilizatornom gorelochnom ustrojstve. [Mathematical modeling of the processes of flow and mixture formation in a cylindrical stabilizer burner device]. (Vol. 3). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 8(69), 40–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24895>
- Fialko, N. M., Sherenkovskii, Ju. V., Mayson, N. V., Meranova, N. O., Butovskii, L. S., Abdulin, M. Z., Polozenko, N. P., Klishch, A. V., Strizheus, S. N., & Timoshchenko, A. B. (2014). Intensifikatsiia protsessov perenosa v gorelochnom ustroistve s tsilindricheskim stabilizatorom plameni. [The intensification of transfer processes within a burner with a cylindrical flame holder]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 24(5), 136–142. [In Russian].
- Lawal, M. S., Fairweather, M., Ingham, D. B., Ma, L., Pourkashanian, M., & Williams, A. (2010). Numerical Study of Emission Characteristics of a Jet Flame in Cross-Flow. *Combustion Science and Technology*, 182(10), 1491–1510. <https://doi.org/10.1080/00102202.2010.496379>
- Ravi, D. (2014). Large Eddy Simulation of Triangular Bluff-Body Stabilized Flames in Partially Premixed Condition. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 20(10), 1234–1238. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2014.20.10.114098>
- Snegirev, A., Kokovina, E., & Tsoy, A. (2015). Coupled simulations of turbulent flame and pyrolysis of combustible material. *Proceedings of the European Combustion Meeting*, Paper P4-16, March 30 – April 2. Budapest, Hungary.
- Subramanian, V., Domingo, P., & Vervisch, L. (2010). Large eddy simulation of forced ignition of an annular bluff-body burner. *Combustion and Flame*, 157, 579–601. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.09.014>
- Volkov, K. N., & Emelyanov, V. N. (2008). *Modelirovanie krupnykh vikhrei v raschetakh turbulentnykh techenii*. [Modeling of large eddies in calculations of turbulent flows]. Moscow: FIZMATLIT. [In Russian].
- Wan, J., Fan, A., Maruta, K., Yao, H., & Liu, W. (2012). Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of premixed hydrogen/air flame in a micro-combustor with a bluff body. *International Journal Hydrogen Energy*, 37, 19190–19197. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.154>
- Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. W. (2003). *Goreniye. Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagriazniaiushchikh veshchestv*. [Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulations, experiments, pollutant formation]. Moscow: Fizmatlit. [In Russian].

**Н. М. Фіалко¹, В. Г. Прокопов¹, С. О. Альошко¹, М. З. Абдулін^{1,2}, К. В. Рокитько¹,
О. Е. Малецька¹, Е. І. Мілко¹, Н. М. Ольховська¹, А. Реграгі¹, А. О. Євтушенко¹**

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИБОРАХ З АСИМЕТРИЧНОЮ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА

Виявлено основні закономірності ізотермічної течії палива і окиснювача в мікрофакельному пальниковому пристрої з односторонньою подачею палива. Отримано дані комп'ютерного моделювання з використанням підходу DES (Detached Eddy Simulation), що представляє собою комбінацію моделей RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) і LES (Large Eddy Simulation) в різних областях простору. Встановлено ефекти впливу довжини закрилка, розташованого на торцевій поверхні стабілізаторів полум'я, на різні характеристики течії. Показано, що наявність закрилків призводить до істотної зміни вихрової структури в сліді за стабілізаторами. Оцінено вплив довжини закрилків на такі параметри течії, як протяжність зони зворотних потоків у закормовій області стабілізаторів полум'я, рівень середньоквадратичних пульсацій швидкості в цих зонах тощо. Встановлено, що зі збільшенням довжини закрилків істотно зростає протяжність зони зворотних потоків за стабілізатором. Виявлено також, що чим коротші закрилки, тим більше перевищує їх довжину протяжність зони зворотних потоків. Виконано аналіз просторового розподілу пульсацій швидкості в цьому пальниковому пристрої за наявності та відсутності закрилків на торцевих поверхнях стабілізаторів полум'я. Показано, що найвищий рівень цих пульсацій спостерігається поблизу границі зони зворотних потоків, віддаленої від торця стабілізатора. Встановлено, що рівень середньоквадратичних пульсацій швидкості є найвищим в умовах відсутності закрилка і знижується зі збільшенням його довжини.

Ключові слова: стабілізатори полум'я; одностороння подача палива; CFD моделювання; зона зворотних потоків; закрилки.

**N. M. Fialko¹, V. G. Prokopov¹, S. A. Alioshko¹, M. Z. Abdulin^{1,2}, K. V. Rokitko¹,
O. E. Maletska¹, E. I. Milko¹, N. N. Olkhovska¹, A. Regragi¹, A. A. Evtushenko¹**

¹ Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

COMPUTER SIMULATION OF FLOW IN MICROJET BURNER DEVICES WITH ASYMMETRIC SUPPLY OF FUEL

This article is devoted to the mathematical modeling of the isothermal flow in microjet burner devices with asymmetric jet supply of fuel by the introduction into the flow of an oxidizer. The studies were conducted on the basis of CFD modeling using the Ansys Fluent software. The Detached Eddy Simulation (DES) method, which is a hybrid approach, was used, in which Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) and Large Eddy Simulation (LES) models are switched in different subregions of the computational domain. Particular attention in this article is paid to the comparative analysis of the flow characteristics in the presence and absence of flaps installed on the end surface of the flame stabilizers. According to the results of computer predictions, it is shown that, the flow pattern in the burner device changes significantly in the presence of flaps. These changes are also defined to be associated primarily with

the formation of vortex structures in the region located behind the stern of the flame stabilizers. The analysis of the effect of flap length on different flow characteristics was performed. An increase in the flap length is shown to lead to a significant increase in the length of the reverse flow zone behind the flame stabilizer. This length is proved to exceed the flap length the greater, the shorter the flap. The features of the velocities distribution within the zone of reverse flows for various values of the flap length are revealed. The analysis of the fields of root-mean-square pulsations of velocity in the considered physical situations was carried out. The subregions corresponding to the highest levels of these pulsations are defined to be located near the boundary of the zone of reverse currents remote from the end of the flame stabilizers. The highest level of these velocity pulsations is revealed to meet the conditions for the absence of flaps on flame stabilizers. Some prospects for further research consist primarily in the analysis of the flow structure in the burner devices considering the conditions of reacting flows. Moreover, the study of the regularities of the mixing of fuel and oxidant is of considerable interest, as well as the burning out of fuel and the formation of temperature fields in the combustion zone.

Keywords: flame stabilizers; jet supply of fuel; CFD simulation; reverse flow zone; flaps.