

УДК 536.24:533

Фиалко Н. М., Прокопов В. Г., Шеренковский Ю. В., Меранова Н. О., Алешко С. А., Майсон Н. В., Полозенко Н. П., Степанова А. И.

Институт технической теплофизики НАН Украины. Украина, г. Киев

CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ЭШЕЛОНИРОВАННЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПЛАМЕНИ

Представлены результаты CFD моделирования рабочих процессов микрофакельных горелочных устройств с различными типами эшелонированных стабилизаторных решеток. Обосновано применение горелок с лестнично эшелонированными решетками стабилизаторов пламени для формирования требуемых температурных полей в зоне горения. Получены данные, иллюстрирующие возможность использования горелочных устройств с гребенчато эшелонированными стабилизаторными решетками для снижения потерь давления по их воздушному тракту без заметного влияния на температурные поля продуктов горения на некотором удалении вниз по потоку от срывных кромок стабилизаторов пламени.

Ключевые слова: горелочное устройство; эшелонирование стабилизаторов пламени; температурные поля; компьютерное моделирование.

Введение

Перспективность применения микрофакельных горелочных устройств определяется целым рядом их известных достоинств. Среди различных вариантов конструктивных решений таких устройств

выделяются устройства с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени. Их использование является, прежде всего, эффективным методом обеспечения требуемых профилей температуры в зоне горения и способом снижения потерь давления в горелках по воздушному тракту.

Большой вклад в разработку основных положений технологии сжигания топлива в горелках с эшелонированными стабилизаторными решетками внесены работами Б. В. Раушенбаха, И. В. Беспалова и др. (см. например, [1]). Данная тематика нашла свое дальнейшее развитие в исследованиях [2–6]. Однако имеющиеся публикации относятся лишь к отдельным аспектам рабочих процессов рассматриваемых горелочных устройств и далеко не исчерпывают потребности их конструирования и эксплуатации.

Формулирование целей статьи

Цель данной работы — установление закономерностей течения и формирования температурных полей в зоне горения для микрофакельных горелочных устройств с различными типами эшелонированных стабилизаторных решеток — лестничным и гребенчатым.

Методика проведения исследований.

В работе ставилась задача анализа возможности использования горелочных устройств с эшелонированными решетками стабилизаторов пламени в условиях, когда требуется смещение ядра факела к одной из стенок амбразуры. Такая необходимость имеет место в ряде огнетехнических объектов в целях дополнительного подогрева их захлажденного пода. В настоящем исследовании рассматривается эффективность применения лестнично эшелонированных стабилизаторных решеток для реализации указанных требований.

Помимо этого решению подлежала задача обоснования использования горелок с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени для снижения потерь давления по их воздушному тракту при условии, что данное эшелонирование не должно существенным образом сказываться на температурных полях на некотором удалении от стабилизаторной решетки. Это условие связано с необходимостью обеспечения требуемого уровня равномерности

температурного поля по сечению факела на определенном расстоянии от срывных кромок стабилизаторов. Применительно к данной ситуации в работе рассматривается возможность использования гребенчато эшелонированных стабилизаторных решеток.

На рис. 1 представлена схема горелочного устройства с лестнично эшелонированной решеткой стабилизаторов пламени. Последняя располагается в прямоугольном канале горелочного устройства, ограниченном входным $\Gamma_{вх}$ и выходным $\Gamma_{вых}$ поперечными сечениями и боковой поверхностью канала $\Gamma_{бок}$. На вход канала подается воздух, который омывает наружные поверхности стенок стабилизаторов. Подвод газа к стабилизатору реализуется из газоподающего коллектора (4) через входное сечение Γ_1 канала (5). Выйдя из канала (5), газ омывает внутренние поверхности стенок стабилизатора, обеспечивая их охлаждение, и через систему газоподающих отверстий (3) в боковых стенках подается непосредственно на горение. Лестничное эшелонирование решетки осуществляется за счет смещения стабилизаторов друг относительно друга вдоль потока на некоторую постоянную величину — шаг смещения $L_{см}$.

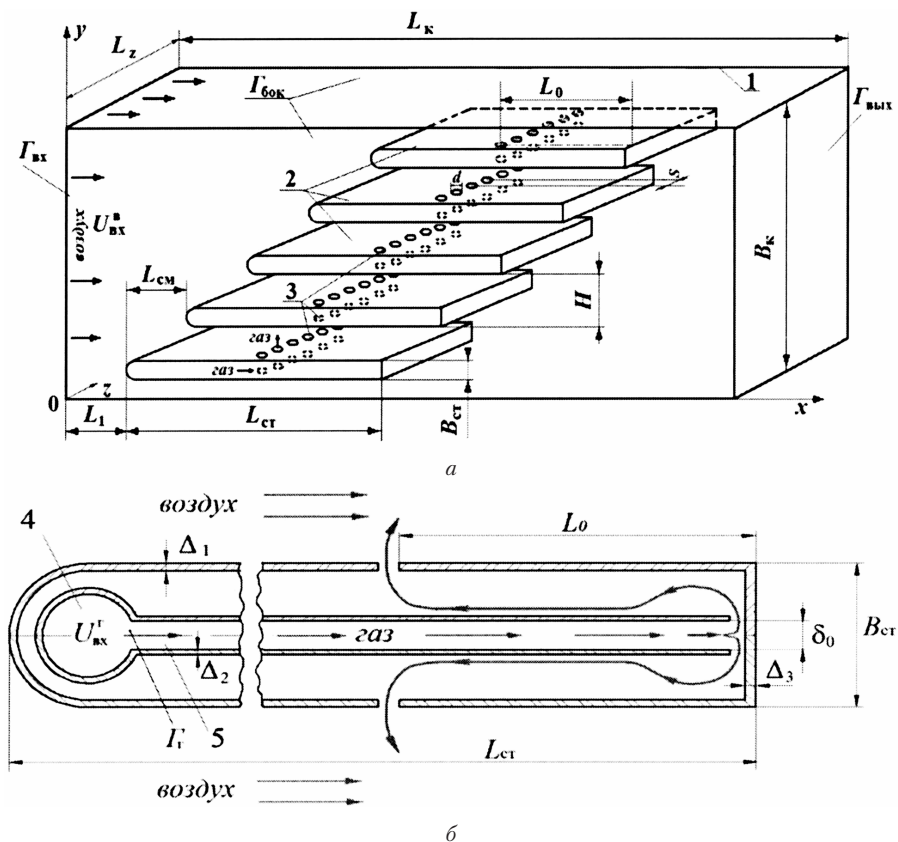


Рис. 1. К постановке задачи: схемы горелочного устройства с лестнично эшелонированной стабилизаторной решеткой (а) и системы охлаждения стабилизатора с обдувом его торцевой поверхности плоской импактной струей: 1 — плоский канал; 2 — стабилизатор пламени; 3 — газоподающие отверстия; 4 — газоподающий коллектор; 5 — канал для охлаждающего газа

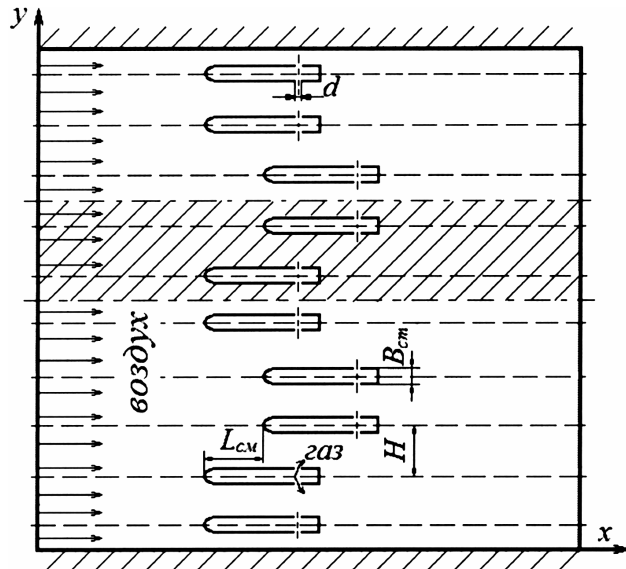


Рис. 2. Схема гребенчато эшелонированной стабилизаторной решетки с периодически смещенными вниз по потоку парами стабилизаторов

Рис. 2 иллюстрирует схему гребенчато эшелонированной решетки с периодически смещенными вниз по потоку парами стабилизаторов пламени. В ходе исследований рассмотрению подлежал периодический элемент решетки данного типа, состоящий из двух смещенных друг относительно друга по течению плоских стабилизаторов пламени (заштрихованный элемент на рис. 2).

Математическую модель, описывающую рабочие процессы в рассматриваемых горелочных устройствах, можно представить в виде:

уравнение движения:

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

уравнение сплошности:

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

уравнение энергии для реагирующих турбулентных потоков:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho I) + \nabla \cdot (\rho U I) = \nabla \cdot q_\Sigma + q_v, \quad (3)$$

уравнение сохранения массы i -го химического компонента:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho U Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i, i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

уравнение состояния для многокомпонентной смеси:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}}, \quad (5)$$

Граничные условия для приведенной выше системы уравнений (1)–(5) определялись следующим образом. В сечениях $\Gamma_{вх}$ и Γ_r , отвечающих входу в канал горелочного устройства и в газоподающие отверстия, задавались постоянные значения скоростей, концентраций, температур и пр. В выходном сечении $\Gamma_{вых}$ канала горелочного устройства ставились так называемые «мягкие» граничные условия – равенство нулю продольных производных всех зависимых переменных. На непроницаемых граничных поверхностях канала и стабилизаторов задавались условия прилипания. На боковых поверхностях канала $\Gamma_{бок}$ принимались граничные условия второго рода.

При решении сформулированной выше задачи использовался DES подход к моделированию турбулентных течений, который является комбинацией RANS и LES моделей и объединяет их основные достоинства [7–8]. Для замыкания рассматриваемой системы уравнений использовалась $k-\epsilon$ realizable модель турбулентности.

Поставленная задача (1)–(5) решалась при следующих исходных данных: ширина стабилизатора $B_{ст} = 0,03$ м; коэффициент загромождения стабилизаторами проходного сечения канала $k_f = 0,4$; диаметр газоподающих отверстий $d = 0,0043$ м; относительный шаг расположения газоподающих отверстий $S/d = 3,72$; длина стабилизатора $L_{ст} = 0,25$ м; длина канала $L_k = 1,5$ м; ширина канала $L_z = 0,16$ м; $L_1 = 0,2$ м; $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0,0015$ м; $\delta_0 = 0,006$ м; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$; для лестнично эшелонированной стабилизаторной решетки: расстояние от срывной кромки стабилизатора до газоподающих отверстий $L_0 = 0,06$ м; шаг смещения стабилизаторов друг относительно друга по потоку $L_{см} = 0,09$ м; расход газа $G_r = 1,19 \cdot 10^{-3}$ кг/с; для гребенчато эшелонированной решетки стабилизаторов пламени: $L_0 = 0,05$ м; $L_{см} = 0,06$ м; $G_r = 0,595 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Изложение основного материала

Характерные результаты выполненных исследований представлены на рис. 3–7. Здесь рис. 4, 6 и 7 иллюстрируют данные, касающиеся теплового состояния зоны горения, а рис. 3 и 5 – структуры потока в изучаемых горелочных устройствах.

Остановимся вначале на рассмотрении особенностей течения в анализируемой физической ситуации. Последние, как известно, в большой мере определяют закономерности формирования температурных полей в зоне горения.

В обоих рассматриваемых случаях – при лестничном и гребенчатом эшелонировании стабилизаторов пламени – в межстабилизаторных и пристеночных каналах ввиду стеснения потока скорость течения повышается, имеет место внедрение струй газа в сносящий поток окислителя, в закормовых

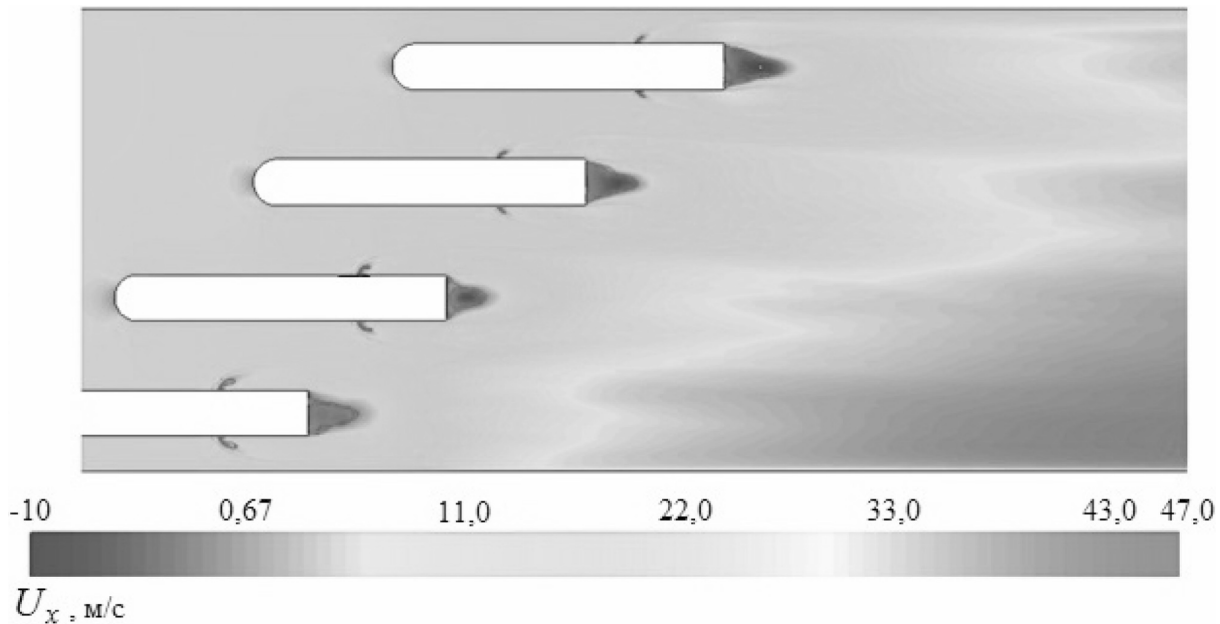


Рис. 3. Поле продольной составляющей вектора скорости U_x в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени

областях стабилизаторов наблюдаются зоны циркуляционного течения (затемненные области, расположенные непосредственно за торцевыми поверхностями стабилизаторов пламени, рис. 3 и 5, а) и за стабилизаторной решеткой вниз по течению происходит ускорение потока, что связано с тепловым расширением газов в условиях горения. Помимо этого в каналах эшелонированных решеток происходит перераспределение расходов воздуха по сравнению с ситуацией неэшелонированного расположения стабилизаторов пламени, т.е. в собственно эшелонированной решетке возникает

определенная несимметричность течения относительно оси канала. Так, в рассматриваемой лестнично эшелонированной решетке стабилизаторов пламени имеет место тенденция к возрастанию расхода воздуха от первого к последнему по течению каналу. Согласно полученным данным расход воздуха во втором по потоку пристеночном канале превышает соответствующий расход в первом по течению канале более чем в 1,5 раза. Иная картина наблюдается в случае гребенчато эшелонированной решетки стабилизаторов. Здесь для периодического элемента решетки расход воздуха в первом по потоку

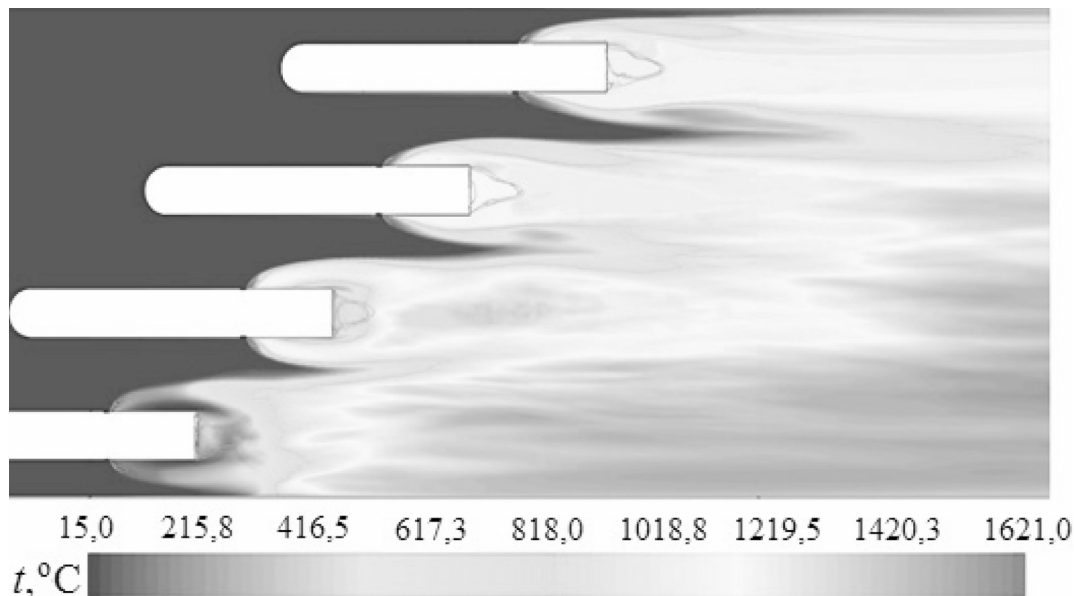


Рис. 4. Поля температуры в продольном сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени

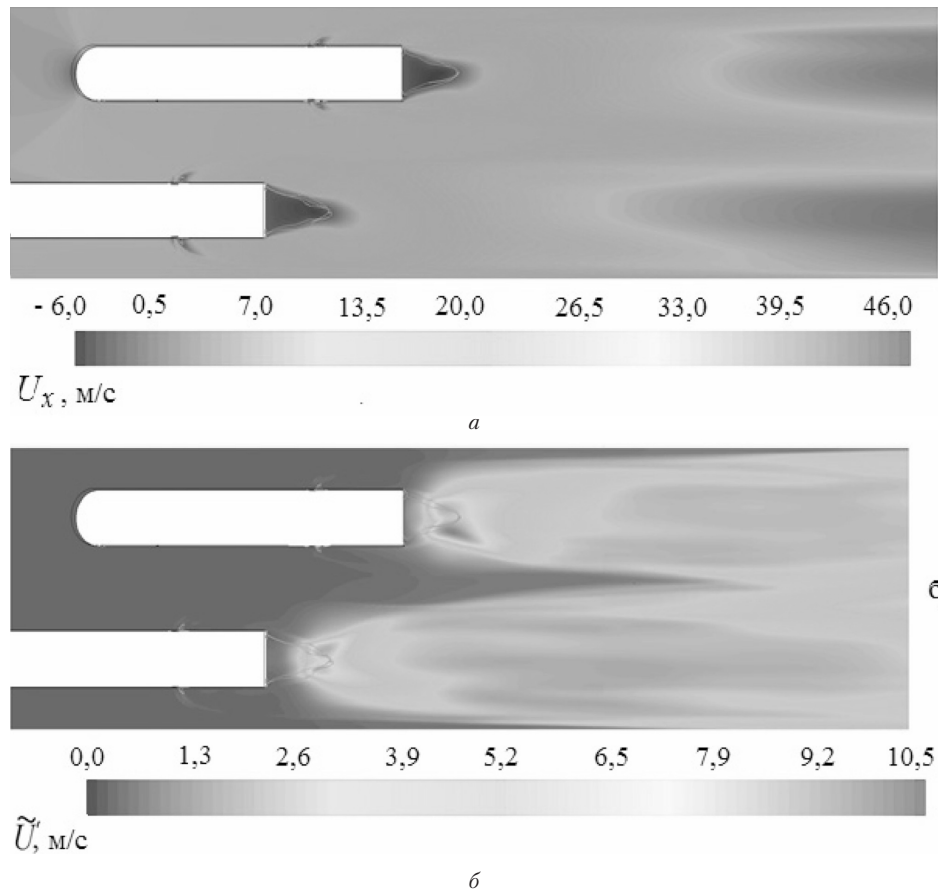


Рис. 5. Поля продольной составляющей вектора скорости $U_x(a)$ и среднеквадратичных пульсаций скорости \tilde{U}' в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для гребенчато эшелонированной решетки стабилизаторов пламени

межстабилизаторном канале оказывается несколько меньше, чем во втором и третьем, где он практически одинаков. При этом расход воздуха в первом по течению канале оказывается меньше чем во втором и третьем лишь в 1,1 раза.

Важно также отметить, что описанное перераспределение расходов воздуха в каналах эшелонированных решеток обуславливает более высокий уровень турбулизации потока за стабилизаторами, отвечающими каналам с повышенными расходами воздуха. Это обстоятельство иллюстрируют данные, приведенные на рис. 5, б. Как видно, более высокий уровень пульсаций наблюдается за вторым по потоку стабилизатором.

Описанные закономерности течения обуславливают специфику температурных полей продуктов горения в рассматриваемых горелочных устройствах.

На рис. 4 в качестве примера представлены результаты компьютерного моделирования поля температуры в продольном сечении горелочного устройства с лестнично эшелонированной решеткой, состоящей из четырех стабилизаторов пламени. Как видно, на некотором удалении от стабилизаторной решетки повышенные уровни температуры имеют место в нижней части канала за первым

по потоку стабилизатором. Так, на расстоянии 0,35 м от решетки отличие средних значений температуры за первым и четвертым по потоку стабилизатором составляет примерно 400 °С.

Обращает на себя внимание также тот факт, что непосредственно за стабилизаторами наблюдается обратная картина. Так, за первым по течению стабилизатором температура оказывается наиболее низкой и последовательно повышается от первого к четвертому стабилизатору. Такой характер изменения температуры обусловлен описанным выше эффектом перераспределения расходов воздуха в каналах лестнично эшелонированной решетки по сравнению с неэшелонированной решеткой. Данное перераспределение, заключающееся в повышении расходов воздуха от первого к последнему по потоку каналу решетки, приводит к уменьшению дальности струй газа в каждом следующем по потоку стабилизаторе и, как следствие, к увеличению содержания метана непосредственно за ним.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что применение лестнично эшелонированных стабилизаторных решеток позволяет получать необходимое смещение ядра факела к одной из стенок амбразуры и соответственно фор-

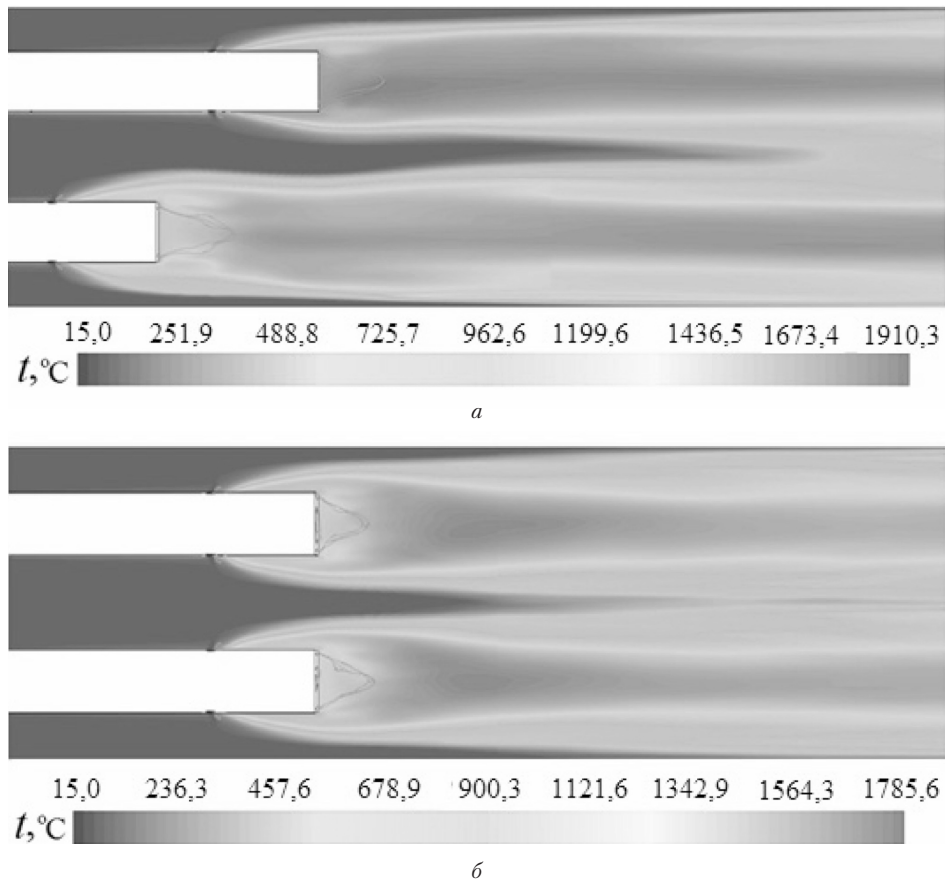


Рис. 6. Поля температуры в продольном сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для гребенчато эшелонированной (а) и неэшелонированной (б) решетки стабилизаторов пламени

мировать существенно неравномерное температурное поле по сечению факела на некотором удалении от стабилизаторной решетки.

Рис. 6 иллюстрирует температурные поля в периодическом элементе гребенчато эшелонированной решетки стабилизаторов пламени и соответствующей неэшелонированной решетки. Здесь в первом случае картина поля температур в целом сходна с таковой для лестнично эшелонированной стабилизаторной решетки. А именно, на удалении от срывной кромки стабилизаторов вниз по потоку более высокие уровни температур наблюдаются за первым по течению стабилизатором пламени, а в непосредственной близости от торцов стабилизаторов – за вторым от них. Согласно полученным данным температурные поля в горелках с гребенчато эшелонированными решетками стабилизаторов пламени характеризуются тем, что на некотором удалении от решетки уровень неравномерности температуры по сечению факела оказывается более низким, чем при расположении торцов стабилизаторов в

одной плоскости. Это обстоятельство иллюстрируют результаты, приведенные на рис. 7.

Как уже отмечалось, гребенчато эшелонированные стабилизаторные решетки, ориентированы на применение в горелочных устройствах, к которым

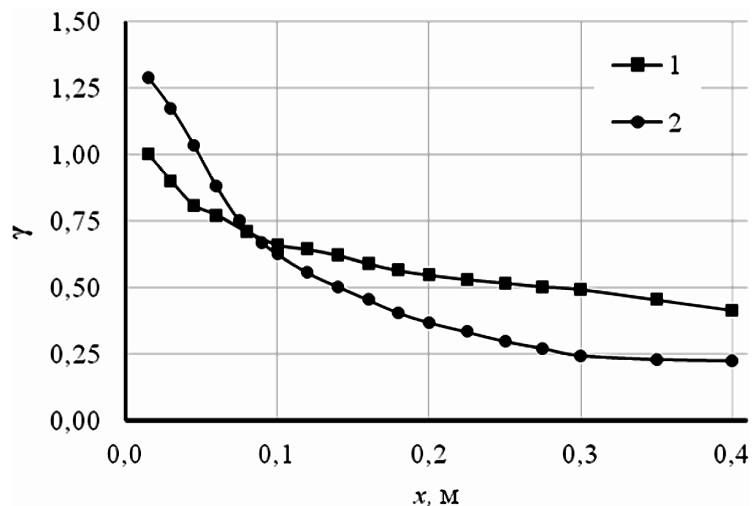


Рис. 7. Изменение коэффициента неравномерности поля температур γ по длине факела для гребенчато эшелонированной (2) и неэшелонированной (1) решетки стабилизаторов пламени

предъявляются повышенные требования в части потерь давления по воздушному тракту. Выполненные исследования показали, что использование рассматриваемого типа эшелонирования позволяет снизить указанные потери давления на 8,6% по сравнению с неэшелонированной стабилизаторной решеткой.

Выводы

Для микрофакельных горелок с различными типами эшелонированных стабилизаторных решеток на основе компьютерного моделирования выполнены исследования закономерностей течения и формирования температурных полей в зоне горения. По результатам проведенных исследований сделан вывод о целесообразности применения горелок с лестнично эшелонированным расположением стабилизаторов пламени при необходимости формирования температурных профилей продуктов горения, смещенных к одной из стенок амбразуры. Показана также возможность использования горелок с гребенчато эшелонированными стабилизаторными решетками для уменьшения потерь давления по воздушному тракту.

Символьные обозначения

U — вектор скорости; τ — время; P — статическое давление; S^* — тензор напряжений, учитывающий вязкие напряжения и дополнительные напряжения, обусловленные турбулентностью; ρ — плотность; q_Σ — суммарный тепловой поток, включающий поток теплопроводностью и дополнительный поток, вызванный турбулентными пульсациями; q_V — источниковый член, учитывающий теплоту химических реакций и перенос теплоты радиацией; I — общая энтальпия, $I = \sum_i Y_i I_i$ (здесь I_i , Y_i — энталь-

пия и массовая концентрация i -го компонента); R_i — источниковый член, учитывающий скорость образования i -ой компоненты в химической реакции; J_i — поток массы i -ой компоненты, обусловленный диффузией и турбулентным переносом; M_i — молекулярная масса i -ой компоненты; N — количество компонент смеси; t — температура; T — абсолютная температура; R — универсальная газовая постоянная; γ — коэффициент относительной неравномерности поля температур в поперечном

сечении факела, $\gamma = \frac{T_{\max} - T_{\text{cp}}}{T_{\text{cp}} - T_{\text{в}}}$, здесь T_{\max} , T_{cp} — мак-

симальная и средняя температура в данном сечении; $T_{\text{в}}$ — температура окружающей среды; $U_{\text{вх}}^r$ — скорость газа на входе в газоподающие отверстия; $U_{\text{вх}}^b$ — скорость воздуха на входе в канал; x , y , z — пространственные координаты в декартовой системе.

Аббревиатуры

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) — полуэмпирический метод, базирующийся на осредненных по Рейнольдсу стационарных и нестационарных уравнениях Навье-Стокса;

LES (Large Eddy Simulation) — метод моделирования крупных вихрей;

DES (Detached Eddy Simulation) — метод моделирования отсоединенных вихрей.

Литература

- [1] Раушенбах Б. В. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б. В. Раушенбах, С. А. Бельый, И. В. Беспалов и др. — М.: Машиностроение, 1964. — 526 с.
- [2] Фиалко Н.М. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Л.С. Бутовский и др. // Промышленная теплотехника. — 2011. — №2. — С. 59–64.
- [3] Фиалко Н.М. Особенности смесеобразования при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени в микрофакельных горелочных устройствах / Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, В.Г. Прокопов, и др. // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XXI международной конференции, Ялта, 7–11 июня 2011 г. — Киев, 2011. — С. 167–170.
- [4] Фиалко Н.М. Структура течі в мікрофакельних пальниках з ешелонуваними решітками стабілізаторів полум'я / Н.М. Фіалко, В.Г. Прокопов, Ю.В. Шеренковський и др. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». — 2014. — 194/3. — С. 107–113
- [5] Фиалко Н.М. Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Л.С. Бутовский и др. // Пром. теплотехника. — 2010. — №6. — С. 28–36.
- [6] Фиалко Н.М. Моделирование структуры течения в эшелонированных решетках стабилизаторов при варьировании шага их смещения / Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, В.Г. Прокопов и др. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2015. — Т.2, №8 (74). — С. 29–34.
- [7] Волков К.Н., Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 368 с.
- [8] Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations / P. R. Spalart // Int. J. Heat Fluid Flow. — 2000. Vol. 21. — P. 252–263.

Fialko N. M., Prokopov V. G., Sherenkovsky Ju. V., Meranova N. O., Aleshko S. A.,
Maison N. V., Polozenko N. P., Stepanova A. I.

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

CFD SIMULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN BURNER DEVICES WITH ECHELONED ARRANGEMENT OF FLAME STABILIZERS

Results of the CFD simulation of workflows in microjet burners with different types of stabilizer echeloned lattice are presented. An application of the burners with a staircase echeloned lattice of flame stabilizers for the formation of the desired temperature fields in the combustion zone is validated. Received data illustrate the ability to use burners with comb echeloned stabilizer lattice to reduce pressure loss in their air path without a noticeable effect on the temperature fields of combustion products.

Keywords: burner device; echeloning flame stabilizers; temperature fields; computer simulation.

References

- [1] Rauschenbach B.V. Physical basis of the working process in combustion chambers of jet engines / B.V. Rauschenbach, S.A.Belyy, I.V.Bespalov, et al. - M.: Mechanical Engineering, 1964. – 526 p.
- [2] Fialko N.M. Specifics of fuel and oxidizer flow at echeloned arrangement of flame stabilizers / N.M. Fialko, V.G. Prokopov, L.S. Butovsky et al. // Industrial heating engineering. - 2011. - №2. - S. 59-64.
- [3] Fialko N.M. Specifics mixing at echeloned arrangement of flame stabilizers in microjet burners / N.M. Fialko, Yu.V. Sherenkovsky, V.G. Prokopov, et al. // Problems of ecology and exploitation of energy facilities.: Proceedings of the XXI International Conference, Yalta, 7 - 11 June, 2011 - Kyiv, 2011. - P. 167-170.
- [4] Fialko N.M. Flow structure in microjet burners with echeloned lattice of flame stabilizers / N.M. Fialko, V.G. Prokopov, Yu.V. Sherenkovsky et al. // Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series «Technology agribusiness and energy». - 2014 - 194/3. - P. 107-113
- [5] Fialko N.M. Simulation of flow structure of isothermal flow in echeloned lattice of flat flame stabilizers / N.M. Fialko, V.G. Prokopov, L.S. Butovsky et al. // Industries heating engineer. - 2010. - №6. - S. 28-36.
- [6] Fialko N.M. Simulation of the flow structure in echeloned lattice of stabilizers by varying the of the displacement step / N.M.Fialko, Yu.V. Sherenkovsky, V.G. Prokopov et al. // Eastern European Journal of advanced technologies. - 2015 - V.2, №8 (74). - S. 29-34.
- [7] Volkov K.N. Large-eddy simulation in the calculation of turbulent flows / K.N. Volkov, V.N. Emelyanov. - M. : FIZMATLIT, 2008. - 368 p.
- [8] Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations / P. R. Spalart // Int. J. Heat Fluid Flow. - 2000. Vol. 21. - P. 252-263.