

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ В МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛКАХ С ПОДКОВООБРАЗНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПЛАМЕНИ

Н.М. ФИАЛКО, доктор технических наук, чл.-корр. НАН Украины

Ю.В. ШЕРЕНКОВСКИЙ, кандидат технических наук

В.Г. ПРОКОПОВ, доктор технических наук

Н.П. ПОЛОЗЕНКО, научный сотрудник

С.А. АЛЕШКО, О.Е. МАЛЕЦКАЯ, кандидаты технических наук

Е.И. МИЛКО, старший научный сотрудник

А.А. ОЗЕРОВ, научный сотрудник

О.Н. КУТНЯК, младший научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Л.С. БУТОВСКИЙ, кандидат технических наук

Национальный технический университет Украины «КПИ»

Приведены данные математического моделирования течения топлива и окислителя в горелочных устройствах стабилизаторного типа при эшелонированном подковообразном расположении стабилизаторов. Представлены результаты сопоставления структуры потока для подковообразно и лестнично эшелонированных решеток стабилизаторов. Рассмотрены такие основные характеристики течения как длины зон обратных токов в закормовых областях стабилизаторов, перераспределение расходов в межстабилизаторных каналах, среднеквадратичные пульсации скорости и пр.

Эшелонирование стабилизаторов пламени, микрофакельные горелки, подковообразное расположение стабилизаторов, структура течения.

Микрофакельное горение в системе стабилизаторов пламени относится к наиболее эффективным способам сжигания газообразного топлива. Среди различных вариантов организации указанного микрофакельного горения важное место занимает сжигание топлива в эшелонированных решетках стабилизаторов, т.е. в условиях смещённого расположения стабилизаторов друг относительно друга вдоль по потоку [1–4]. Благодаря применению различным образом эшелонированных стабилизаторных решеток возможно обеспечение формирования требуемых для тех или иных ситуаций температурных полей в зоне горения. При этом особо выделяются две характерные ситуации эшелонирования

© Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, В.Г. Прокопов,
Н.П. Полозенко, С.А. Алешко, О.Е. Малецкая,
Е.И. Милко, А.А. Озеров, О.Н. Кутняк, Л.С. Бутковский, 2015

стабилизаторов. Первая из них отвечает условиям, когда в целях дополнительного подогрева захлажденного пода котла требуется соответствующее смещение ядра факела. Такая необходимость имеет место для целого ряда типов котлоагрегатов таких как ДКВР, ТВГ и т.д. Для реализации указанных условий эффективным оказывается применение так называемого лестничного эшелонирования стабилизаторов пламени.

Следующая из рассмотренных характерных ситуаций соответствует необходимости снижения тепловой нагрузки на стенки амбразуры котла. Здесь для выполнения указанного требования рациональным является использование различных вариантов подковообразного расположения стабилизаторов пламени.

В настоящее время отсутствует полнота информации об особенностях протекания рабочих процессов в горелочных устройствах с эшелонированным расположением стабилизаторов, которая необходима для конструирования устройств такого типа.

Цель исследований – установление основных закономерностей течения в микрофакельных горелках с подковообразно эшелонированными решетками плоских стабилизаторов пламени.

Материалы и методика исследований. Рассматривается картина течения природного газа и воздуха в стабилизаторных горелочных устройствах при подковообразном размещении стабилизаторов (рис. 1).

Решетка стабилизаторов 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. Газ к стабилизатору подводится из газоподающего коллектора (4) через входное сечение $\Gamma_{г}$ канала (5). Выйдя из канала (5), газ омывает внутренние поверхности стенок стабилизатора, обеспечивая их охлаждение, и через систему газоподающих отверстий (3) в боковых стенках стабилизатора подается непосредственно на горение. Эшелонирование решетки осуществляется за счет смещения стабилизаторов друг относительно друга вдоль потока на некоторую постоянную величину – шаг смещения $L_{см}$ (рис.1, а).

Математическая модель, описывающая процессы течения и массопереноса в канале горелочного устройства, включает в себя следующие дифференциальные уравнения в частных производных.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды; t – время; x_j – декартова координата, $j=1,2,3$; U_j – компоненты вектора скорости в направлении x_j .

Заметим, что в уравнении (1) и в дальнейших соотношениях подразумевается суммирование по повторяющемуся индексу.

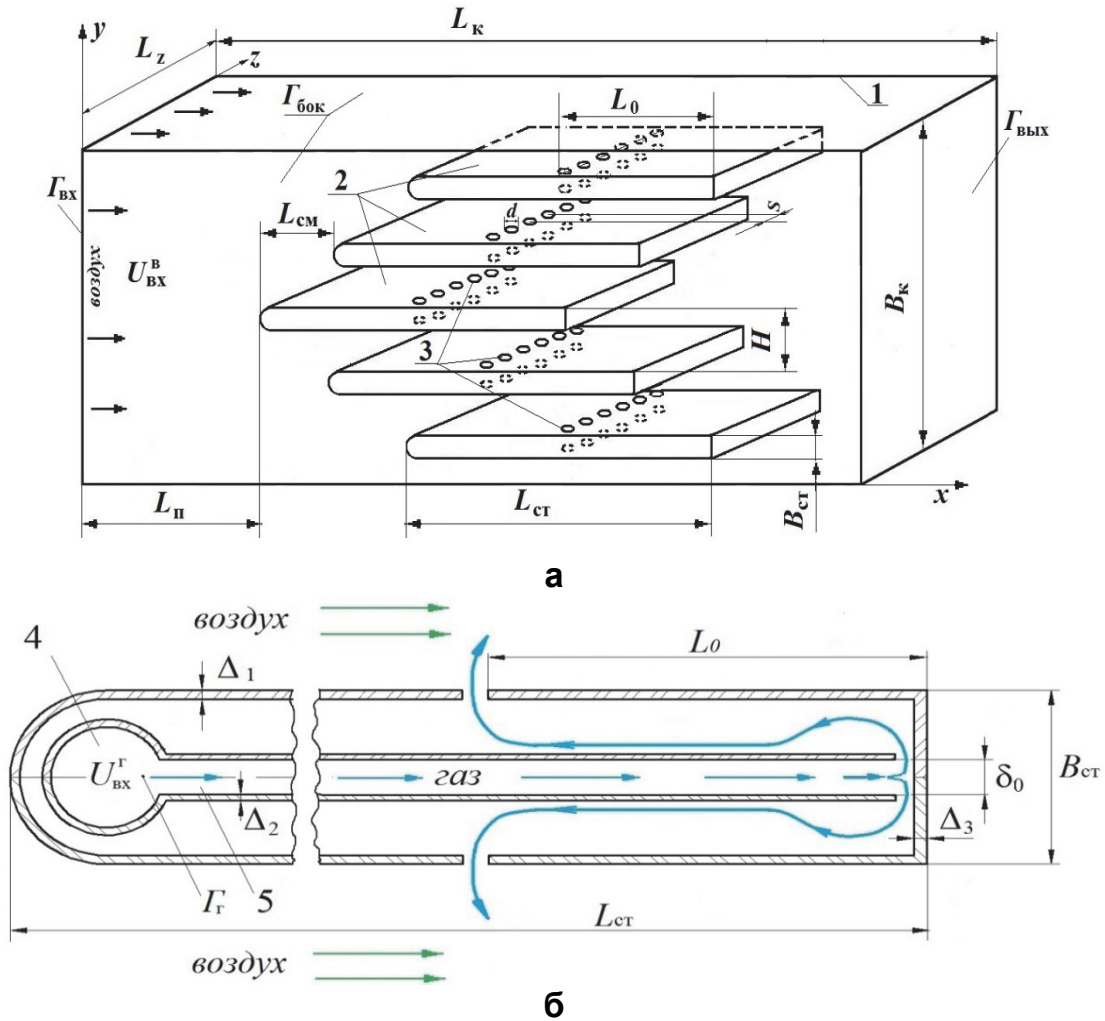


Рис.1. Схема сжигания газа в подковообразно эшелонированной стабилизаторной решетке (а) и система охлаждения (б) стабилизатора с обдувом его торцевой поверхности плоской импактной струей:

1 – плоский канал; 2 – стабилизатор пламени; 3 – газоподающие отверстия; 4 – газоподающий коллектор; 5 – канал для охлаждающего газа

Заметим, что в уравнении (1) и в дальнейших соотношениях подразумевается суммирование по повторяющемуся индексу.

Уравнение движения:

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

где P – статическое давление; τ_{ij} – компоненты тензора напряжений,

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

Здесь – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; μ, μ_T – молекулярная и турбулентная динамическая вязкость; δ_{ij} – символ Кронекера; S_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций,

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Уравнения сохранения массы компонентов смеси могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho_K}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_K U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Sc_K} + \frac{\nu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial \rho_K}{\partial x_j}, \quad (5)$$

$$K = 1, 2, \dots, N-1,$$

где ρ_K – парциальная массовая плотность K -го компонента, $\rho_K = \rho w_K$; w_K – массовая концентрация K -го компонента; N – число

компонентов смеси; Sc_K – число Шмидта K -го компонента, $Sc_K = \frac{\nu}{D_K}$; D_K – коэффициент диффузии K -го компонента; ν, ν_T – кинематическая и турбулентная кинематическая вязкость; Sc_T – турбулентное число Шмидта.

Замыкание приведенной системы уравнений осуществляется на основе RNGk- ϵ модели турбулентности. Численная реализация решения рассматриваемой задачи осуществлялась с применением программного пакета Fluent.

Результаты исследований. В качестве примера рассматривается ситуация, отвечающая решетке, состоящей из трех стабилизаторов пламени (рис.2).

На рисунках 3–4 и в таблицах 1–3 приведены характерные результаты выполненных исследований, которые соответствуют следующим значениям исходных параметров: $U_{вх}^B = 6,8$ м/с; $U_{вх}^Г = 24$ м/с; $L_p = 0,2$ м; $L_{ст} = 0,215$ м; $L_k = 1,5$ м; $H = 0,075$ м; $V_k = 0,225$ м; $V_{ст} = 0,03$ м; $L_{см} = 0,06$ м; $L_0 = 0,02$ м; $d = 0,0045$ м; $S/d = 3,55$, где S – шаг расположения газоподающих отверстий: топливо – природный газ, окислитель – воздух.

На рис. 3 приведены поля продольной составляющей скорости U_x в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, при подковообразном расположении стабилизаторов и установке их торцов в одной плоскости. Как видно, скорости в межстабилизаторных каналах в случае эшелонированного расположения стабилизаторов оказываются более высокими, чем скорости в пристеночных каналах. То есть в каналах подковообразно эшелонированной решетки происходит определенное перераспределение расходов в сравнении с условиями, когда такое эшелонирование отсутствует.

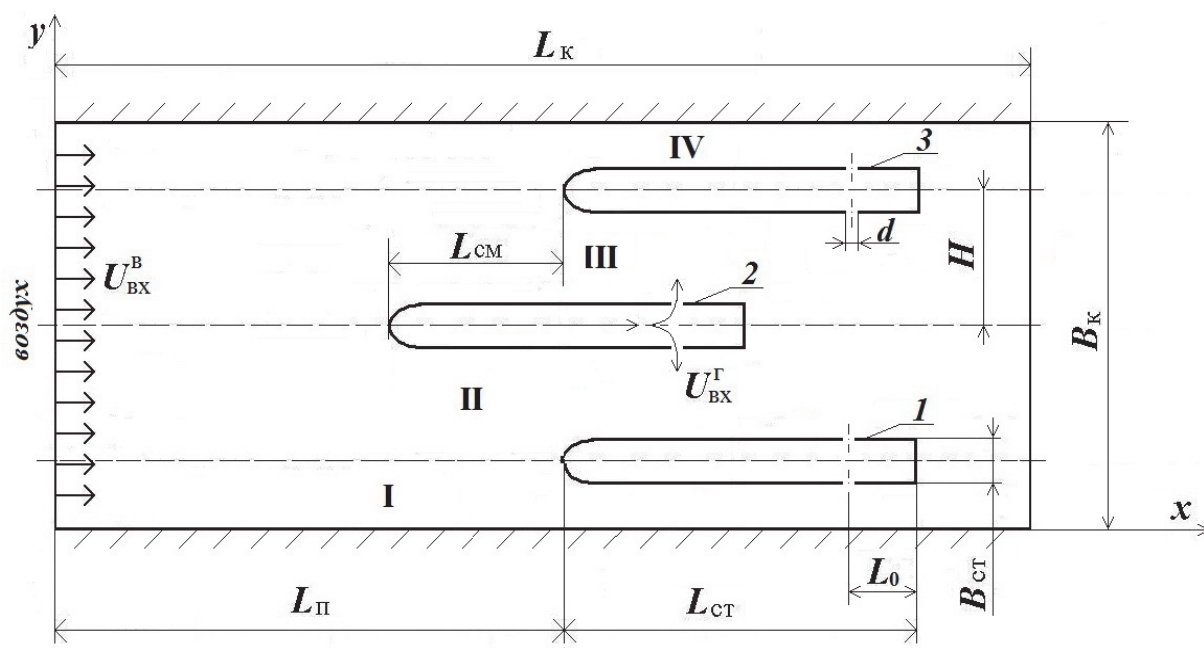


Рис. 2. К постановке задачи для подковообразно эшелонированной решетки стабилизаторов:
1, 2, 3 – первый, второй и третий стабилизаторы пламени;
I, IV – пристеночные каналы; II, III – межстабилизаторные каналы

Результаты сопоставления средних значений скорости в каналах для подковообразно и лестнично эшелонированных решетки, а также для случая отсутствия эшелонирования представлены в табл. 1 и 2.

Здесь $\Delta = \bar{U}_x^{\text{э}} - \bar{U}_x^{\text{нэ}}$, где $\bar{U}_x^{\text{э}}$, $\bar{U}_x^{\text{нэ}}$ – среднее значение продольной составляющей скорости в каналах эшелонированной и неэшелонированной

решетки соответственно;
$$\delta = \frac{\Delta}{\bar{U}_x^{\text{нэ}}} \cdot 100\%$$

1. Средние значения продольной составляющей скорости \bar{U}_x в каналах неэшелонированной и эшелонированных решеток стабилизаторов пламени

Тип решетки	Скорости \bar{U}_x в каналах, м/с			
	I	II	III	IV
Неэшелонированная	11,0	11,5	11,5	11,0
Лестнично эшелонированная	11,5	12,18	11,18	9,76
Подковообразно эшелонированная	10,09	11,97	11,97	10,9

2. Абсолютные Δ и относительные δ отклонения средних значений продольной составляющей скорости в каналах эшелонированных решеток от их величин при отсутствии эшелонирования

Тип решетки		Номер канала			
		I	II	III	IV
Лестнично эшелонированная	Δ , м/с	0,55	0,68	-0,32	-1,24
Подковообразно эшелонированная	δ , %	5,00	5,91	-2,78	-11,27
Лестнично эшелонированная	Δ , м/с	-0,91	0,47	0,47	-0,91
Подковообразно эшелонированная	δ , %	-8,27	4,09	4,09	-8,27

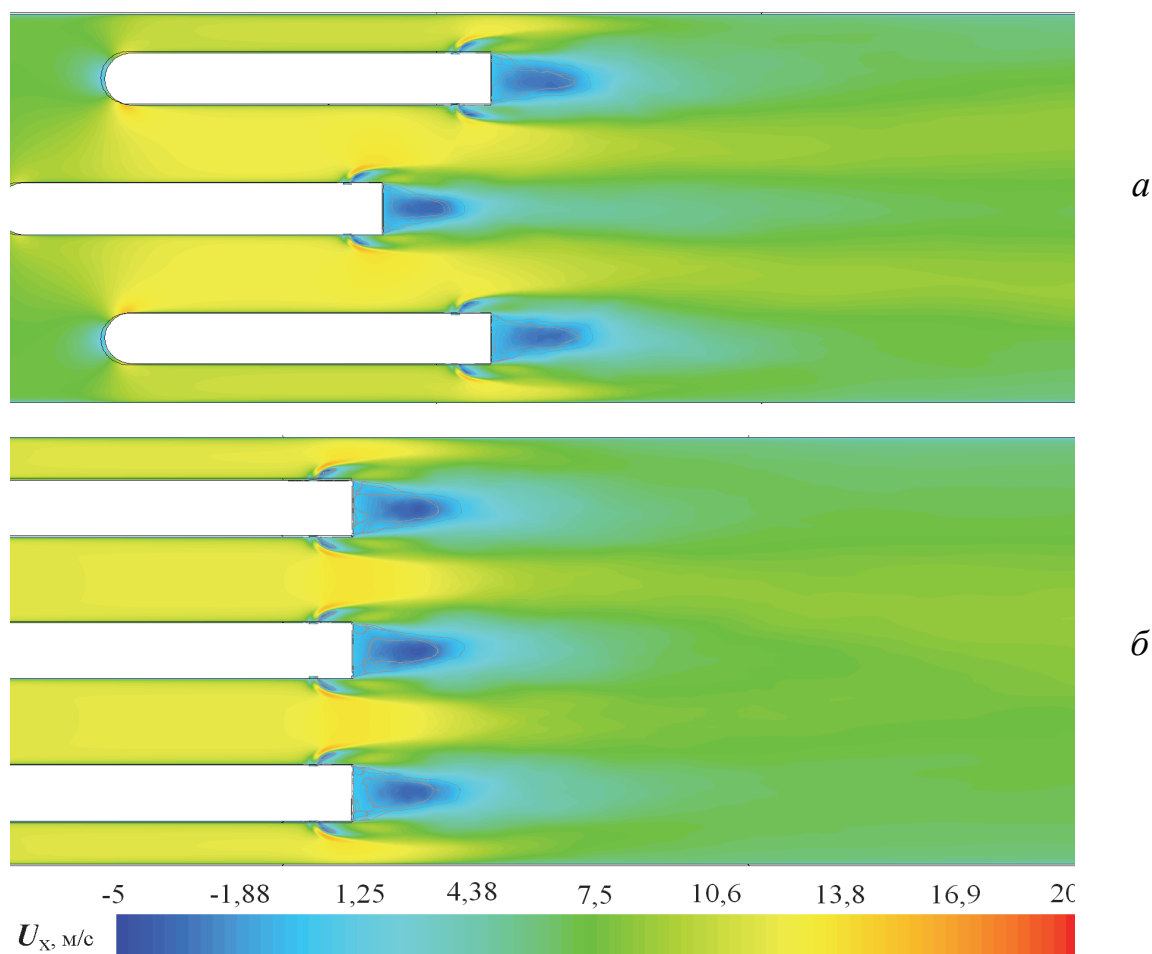


Рис. 3. Поле продольной составляющей вектора скорости в сечении XOY , проходящем через центры газоподающих отверстий, для подковообразной (а) и незешелонированной (б) решеток стабилизаторов

Из сопоставления данных, приведенных в таблицах, следует, что характер отклонения значений скорости \bar{U}_x в каналах эшелонированных решеток от их величин $\bar{U}_x^{не}$ при отсутствии эшелонирования имеет общие особенности для подковообразного и лестничного расположения стабилизаторов. А именно, в обеих ситуациях значения \bar{U}_x увеличиваются в

каналах, прилежащих к первому по потоку стабилизатору и уменьшаются в остальных каналах. При этом уровень максимального положительного отклонения Δ оказывается несколько более высоким в случае лестнично эшелонированной решетки. Большим в этой ситуации является и модуль максимально отрицательного отклонения Δ .

Согласно полученным данным для сопоставляемых решеток с лестничным и подковообразным расположением стабилизаторов наблюдаются также определенные отличия и в характеристиках зон обратных токов в закормовых областях стабилизаторов. Как видно из табл. 3, в случае подковообразной решетки протяженности зон обратных токов за всеми стабилизаторами превышают соответствующие значения для лестнично эшелонированной решетки. При этом в обеих ситуациях наибольшие длины данных зон отвечают центральному стабилизатору, для периферийных стабилизаторов они заметно ниже. Что же касается скоростей U_{\max} в зонах обратных токов, то в рассматриваемых случаях для центрального стабилизатора они равны между собой, а для периферийных стабилизаторов оказываются меньшими при подковообразном расположении стабилизаторов.

Рис. 4 иллюстрирует поля среднеквадратичных пульсаций скорости $\overline{U'}$ в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий. Из сопоставления данных на рис. 4 следует, что при лестничном и подковообразном расположении стабилизаторов, а также при установке их торцов в одной плоскости наибольшие значения пульсаций скорости $\overline{U'}$ наблюдаются за срывной кромкой каждого из стабилизаторов. Однако при этом поля пульсаций для рассматриваемых эшелонированной и незешелонированной решеток отличаются весьма существенно в качественном и количественном отношении. Так, в случае незешелонированной решетки картины полей пульсаций близки за всеми стабилизаторами, а при их эшелонированном расположении существенно различны для разных стабилизаторов. А именно, как в случае лестнично, так и подковообразно эшелонированной решетки, за первым по потоку стабилизатором (центральным для подковообразного расположения стабилизаторов и нижним периферийным для их лестничного расположения) уровни пульсаций скорости $\overline{U'}$ значительно выше, чем за остальными стабилизаторами. При этом данные уровни за указанным первым стабилизатором близки к таковым в условиях отсутствия эшелонирования, т.е. в целом турбулизация потока за решеткой стабилизаторов оказывается более существенной в случае расположения торцов стабилизаторов в одной плоскости.

Потери давления в горелочном устройстве с подковообразно эшелонированной решеткой оказываются весьма близкими к таковым при лестничном эшелонировании стабилизаторов и составляют 39,5 Па. Эти потери несколько меньше по величине по сравнению с ситуацией, отвечающей незешелонированной решетке. Здесь данные потери равны 43,0 Па. Последнее обусловлено, в частности, большей турбулизацией потока в закормовых областях стабилизаторов при расположении их торцов в одной плоскости.

3. Протяженность зон обратных токов $L_{от_i}$ для разных стабилизаторов пламени ($i = 1, 2, 3$) и максимальные по абсолютной величине значения скоростей в этих зонах U_{max} при $L_{см} = 60 \cdot 10^{-3}$ м для лестнично и подковообразно эшелонированных решеток

Параметр	Лестничная решетка			Подковообразная решетка ^б		
	Номер стабилизатора i			Номер стабилизатора τ		
	1	2	3	1	2	3
Протяженность $L_{от_i}, 10^{-3}$ м	49,4	59,1	46,8	55,7	65,6	55,7
Максимальная скорость $U_{max}, \text{ м/с}$	4,43	3,7	3,9	3,17	3,7	3,17

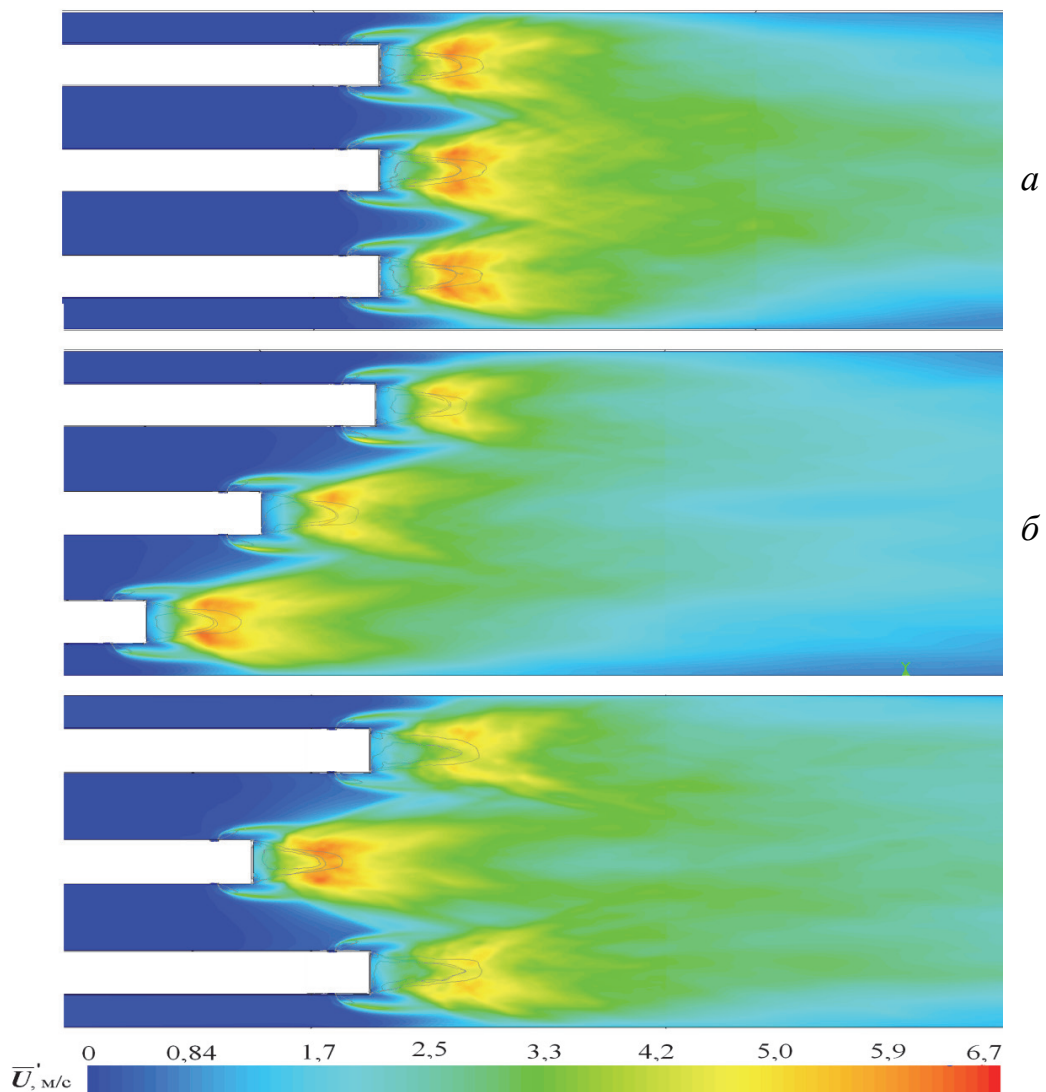


Рис. 4. Поле среднеквадратичных значений пульсаций скорости \bar{U}' в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для незешелонированной (а), лестнично (б) и подковообразно (в) эшелонированных решеток стабилизаторов

Выводы. Выявлены основные закономерности течения в горелках стабилизаторного типа в условиях подковообразного расположения стабилизаторов пламени. Выполнен сравнительный анализ характеристик течения для подковообразно и лестнично эшелонированных решеток стабилизаторов, а также для их незшелонированного расположения. Обнаружен эффект перераспределения расходов в каналах эшелонированных решеток по сравнению с ситуацией расположения торцов стабилизаторов в одной плоскости. Установлено также, что применение эшелонирования позволяет несколько снизить потери давления в горелочном устройстве.

Список литературы

1. 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.

2. 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: XXI междунар. конф., Ялта, 7 -11 июня 2011 г. – К., 2011. – С. 167–170.

3. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Л.С. Бутовский [и др.] // Пром. теплотехника. – 2011. – №2. – С. 59–64.

4. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / [Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беспалов и др.] – М.: Машиностроение, 1964. – 526 с.

Наведено дані математичного моделювання течії палива та окисника в пальникових пристроях стабілізаторного типу при ешелонованому підковоподібному розташуванні стабілізаторів. Подано результати зіставлення структури потоку для підковоподібно і сходовоешелонованих решіток стабілізаторів. Розглянуто такі основні характеристики течії, як довжини зон зворотних токів у закормових областях стабілізаторів, перерозподіл витрати міжстабілізаторних каналах, середньоквадратичні пульсації швидкості та ін.

Ешелонування стабілізаторів полум'я, мікрофакельні пальники, підковоподібне розташування стабілізаторів, структура течії.

The data of mathematical modelling of flow of fuel and oxidizer in the stabilizer type burner at echeloned horseshoe-shaped arrangement of stabilizers are presented. The results of comparing of the flow structure for horseshoe and staircase echeloned arrays of stabilizers are submitted. The basic flow characteristics such as the length of the zones of reverse currents in astern areas of stabilizers, redistribution of costs in channels between the stabilizers, the rms velocity fluctuations et al are reviewed.

Echeloned flame stabilizers, micro-flame burners, horseshoe-shaped arrangement of stabilizers, flow structure.