

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ЭШЕЛОНИРОВАННЫХ РЕШЕТКАХ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ШАГА ИХ СМЕЩЕНИЯ

**Н. М. Фиалко**

Заслуженный деятель науки и техники Украины, член-корреспондент  
НАН Украины, доктор технических наук,  
профессор, заведующий отделом\*

E-mail: nmfialko@ukr.net

**Ю. В. Шеренковский**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*

E-mail: nmfialko@ukr.net

**В. Г. Прокопов**

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник\*

E-mail: prokopov\_vg@ukr.net

**Н. П. Полозенко**

Научный сотрудник\*

E-mail: nina\_polozenko@ukr.net

**Н. О. Меранова**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*

E-mail: mnata1956@ukr.net

**С. А. Алешко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

**Г. В. Иваненко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

**В. Л. Юрчук**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

**Е. И. Милко**

Старший научный сотрудник\*

**Н. Н. Ольховская**

Научный сотрудник\*

\*Отдел малой энергетики

Институт технической теплофизики НАН Украины  
ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03680

*Досліджено ефекти впливу кроку зміщення стабілізаторів полум'я один відносно одного по потоку на закономірності течії палива і окисника в стабілізаторних решітках мікрофакельних пальникових пристроїв. Встановлено залежність від даного кроку характеристик потоку. Виконано аналіз особливостей впливу кроку зміщення стабілізаторів на вихороутворення в закормових зонах стабілізаторів, пульсаційні параметри течії та ін*

*Ключові слова: решітка-стабілізатора полум'я, крок зміщення стабілізаторів, течія палива і окисника*

*Исследованы эффекты влияния шага смещения стабилизаторов пламени друг относительно друга по потоку на закономерности течения топлива и окислителя в стабилизаторных решетках микрофакельных горелочных устройств. Установлена зависимость от данного шага характеристик потока. Выполнен анализ особенностей влияния шага смещения стабилизаторов на вихреобразование в закормовых зонах стабилизаторов, пульсационные параметры течения и пр*

*Ключевые слова: решетка стабилизатора пламени, шаг смещения стабилизаторов, течение топлива и окислителя*

## 1. Введение

Среди различных способов эффективного сжигания газообразного топлива важное место занимает его сжигание в горелочных устройствах стабилизаторного типа [1–6]. При этом особо выделяется организация такого сжигания в эшелонированных решетках стабилизаторов пламени, т. е. в условиях, когда стабилизаторы смещены друг относительно друга вдоль по потоку. Применение эшелонированных стабилизаторных решеток служит целям формирования необходимых температурных полей в зоне горения. Кроме того

благодаря эшелонированному расположению стабилизаторов оказывается возможным устранение спонтанного нарушения симметрии течения при высокой плотности размещения стабилизаторов в горелочном устройстве. К достоинствам применения эшелонированных решеток относится также и то, что в этом случае потери давления в горелочном устройстве могут быть заметно снижены.

Принимая во внимание вышеизложенное, актуальным является исследование различных аспектов рабочих процессов сжигания газообразного топлива в эшелонированных решетках стабилизаторов пламени.

**2. Анализ литературных данных**

Основопологающим исследованием рабочих процессов горелочных устройств при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени является монография [7]. В ней рассматривается целый ряд вопросов, касающийся особенностей течения, смесеобразования, выгорания топлива и пр. в условиях лестничного расположения угольковых стабилизаторов пламени.

В последний период активно развиваются исследования процессов переноса в эшелонированных решетках плоских стабилизаторов пламени [8–12]. Так, [8] представлен анализ структуры течения изотермического потока в решетках данного типа с чередующимся по потоку расположением стабилизаторов. При этом рассмотрены эффекты влияния на картину течения коэффициента загромождения стабилизаторами проходного сечения горелочного устройства. Продолжением работы [8] является исследование [9], в котором приводятся данные сопоставления характеристик течения в указанных эшелонированных решетках при наличии и отсутствии струйной подачи газа в сносящий поток окислителя.

Исследования [10–12] посвящены анализу процессов течения и смесеобразования топлива и окислителя в лестнично эшелонированных стабилизаторных решетках. В [10] обсуждаются данные моделирования картины течения в этой физической ситуации. Особенности влияния мощности горелочного устройства на характеристики потока в лестнично эшелонированных решетках анализируются в [11]. Результаты исследований процессов смесеобразования топлива и окислителя в таких решетках представлены в работе [12].

Однако целый ряд вопросов, касающихся рабочих процессов в горелочных устройствах с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени, и имеющих важное значение для конструирования таких устройств, остается не изученным.

**3. Цель работы и задачи исследования**

Цель данной работы состоит в установлении закономерностей влияния шага смещения стабилизаторов на характеристики течения в лестнично эшелонированных решетках стабилизаторов пламени.

В рамках настоящего исследования решению подлежали следующие задачи:

- определить эффекты влияния величины шага смещения стабилизаторов пламени друг относительно друга вдоль по потоку на картину перераспределения расходов воздуха в стабилизаторной решетке;
- установить особенности циркуляционного течения в ближнем следе стабилизаторов при варьировании их относительного смещения;
- исследовать влияние шага смещения стабилизаторов на пульсационные характеристики течения в рассматриваемой ситуации;
- определить потери давления в горелочном устройстве стабилизаторного типа при различных значениях шага смещения стабилизаторов.

**4. Особенности математического моделирования структуры течения в эшелонированных решетках стабилизаторов**

Рассматривается картина течения природного газа и воздуха в стабилизаторных горелочных устройствах при лестничном размещении стабилизаторов (рис. 1 а, б).

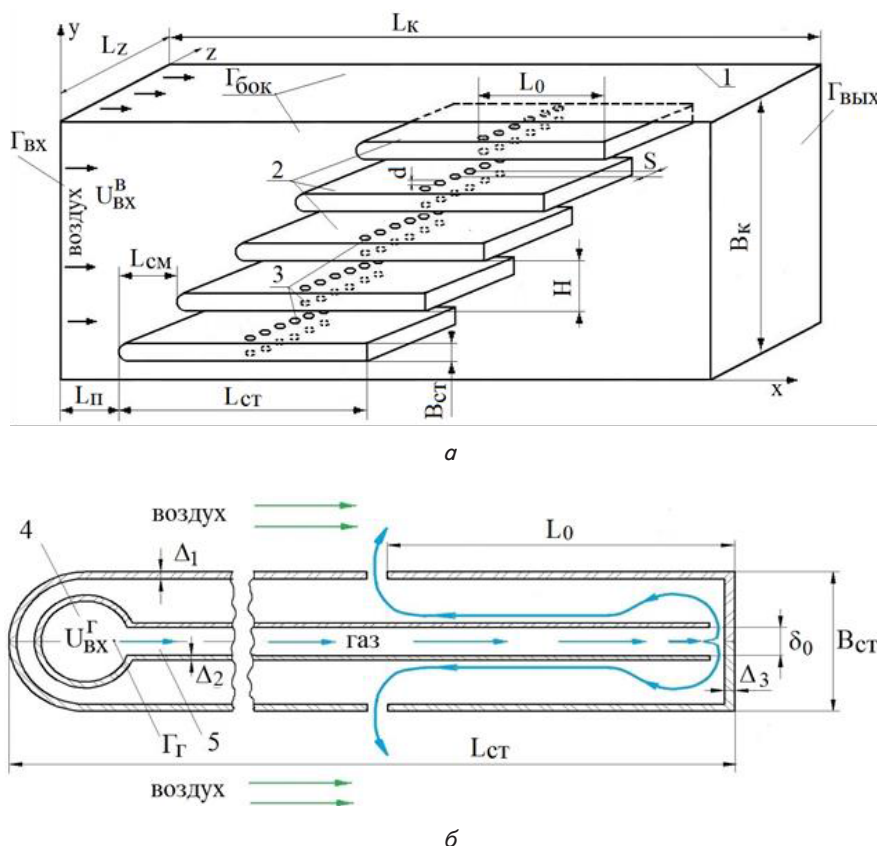


Рис. 1. К постановке задачи: а – схема сжигания газа в лестнично эшелонированной стабилизаторной решетке, б – система охлаждения стабилизатора с обдувом его торцевой поверхности плоской импактной струей; 1 – плоский канал; 2 – стабилизатор пламени; 3 – газоподающие отверстия; 4 – газоподающий коллектор; 5 – канал для охлаждающего газа

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. Подвод газа к стабилизатору реализуется из газоподающего коллектора (4) через входное сечение  $\Gamma_r$  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  $L_{cm}$  (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  $\rho$  – 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.

Уравнения 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;  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора напряжений,

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

Здесь  $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;  $\mu, \mu_T$  – молекулярная и турбулентная динамическая вязкость;  $\delta_{ij}$  – 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

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

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

где  $\rho_K$  – парциальная массовая плотность  $k$ -го компонента,  $\rho_K = \rho \cdot w_K$ ;  $w_K$  – массовая концентрация  $k$ -го компонента;  $N$  – число компонентов смеси;  $Sc_K$  – число

Шмидта  $k$ -го компонента,  $Sc_K = \frac{v}{D_K}$ ;  $D_K$  – коэффициент диффузии  $k$ -го компонента;  $v, v_T$  – кинематическая и турбулентная кинематическая вязкость;  $Sc_T$  – турбулентное число Шмидта.

Замыкание приведенной системы уравнений осуществляется на основе RNG  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности. Численная реализация решения рассматриваемой задачи осуществлялась с применением программного пакета Fluent.

В качестве примера рассматривается ситуация, отвечающая решетке, состоящей из трех стабилизаторов пламени. Математическое моделирование проводилось при следующих значениях исходных параметров:  $U_{bx}^b = 6,8$  м/с;  $U_{bx}^r = 24$  м/с;  $L_{п} = 0,2$  м;  $L_{сг} = 0,215$  м;  $L_K = 1,5$  м;  $H = 0,075$  м;  $B_K = 0,225$  м;  $B_{сг} = 0,03$  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. Безразмерное значение шага смещения стабилизаторов друг относительно друга по потоку  $\bar{L}_{cm}$  изменялось в диапазоне от 0,0 до 3,0 ( $\bar{L}_{cm} = L_{cm} / B_{сг}$ ).

### 5. Основные результаты моделирования течения топлива и окислителя в эшелонированной решетке стабилизаторов пламени

Характерные результаты выполненного математического моделирования представлены на рис. 2–8 и в табл. 1–3. Как показали проведенные исследования, течение в лестнично эшелонированной решетке стабилизаторов является существенно несимметричным. При этом в межстабилизаторном канале II средняя скорость  $\bar{U}_x$  превышает соответствующее значение в неэшелонированной решетке, а в межстабилизаторном канале III напротив оказываются ниже. Аналогичным образом соотносятся скорости  $\bar{U}_x$  и для пристеночных каналов I и IV.

Таким образом, в эшелонированной решетке происходит определенное перераспределение расходов в ее каналах по сравнению с ситуацией, когда торцы стабилизаторов располагаются в одной плоскости.

Из полученных данных следует, что с увеличением  $\bar{L}_{cm}$  указанная несимметричность течения возрастает (табл. 1). Так, средняя скорость  $\bar{U}_x$  в пристеночном канале I превышает значение этой скорости в пристеночном канале IV на 9,2; 18,3 и 21,6 % при  $\bar{L}_{cm} = 1,0; 2,0$  и 3,0 соответственно. Данные, приведенные в табл. 2, иллюстрируют величины отличий скоростей  $\bar{U}_x$  в каналах стабилизаторной решетки при наличии и отсутствии эшелонирования стабилизаторов. Как видно, имеет место тенденция к возрастанию этих отличий с увеличением шага смещения стабилизаторов  $\bar{L}_{cm}$ .

Таблица 1

Средние значения продольной составляющей скорости (м/с) в каналах неэшелонированной ( $\bar{L}_{cm} = 0$ ) и лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов при разных величинах шага смещения  $\bar{L}_{cm}$  стабилизаторов друг относительно друга

$\bar{L}_{cm}$	Номер канала			
	I	II	III	IV
0,0	11,00	11,50	11,50	11,00
1,0	11,42	11,80	11,28	10,46
2,0	11,55	12,18	11,18	9,76
3,0	11,55	12,37	11,12	9,50

Таблица 2

Абсолютные  $\Delta$  и относительные  $\delta$  отклонения средних значений продольной составляющей скорости в каналах лестнично эшелонированной решетки от их величин при отсутствии эшелонирования для разных шагов смещения  $\bar{L}_{см}$  стабилизаторов друг относительно друга

$\bar{L}_{см}$		Номер канала			
		I	II	III	IV
1,0	$\Delta$ , м/с	0,42	0,3	-0,22	-0,54
	$\delta$ , %	3,8	2,6	-1,9	-4,9
2,0	$\Delta$ , м/с	0,55	0,68	-0,32	-1,24
	$\delta$ , %	5,0	5,9	-2,8	-11,3
3,0	$\Delta$ , м/с	0,55	0,87	-0,38	-1,5
	$\delta$ , %	5,0	7,5	-3,3	-13,6

Согласно результатам математического моделирования, представленным на рис. 2–4, за эшелонированной решеткой стабилизаторов наблюдается некоторое отклонение потока в направлении последнего из них по течению. Данное обстоятельство связано с наличием смещенных вниз по потоку зон пониженного давления за вторым и третьим стабилизаторами пламени. При этом степень указанного отклонения несколько возрастает с увеличением относительного смещения стабилизаторов  $\bar{L}_{см}$ . Данную тенденцию иллюстрируют также приведенные на рис. 5 эпюры скорости  $U_x$  при разных значениях  $\bar{L}_{см}$ . Как видно, в нижней части канала горелочного устройства максимумы и минимумы скорости  $U_x$  заметно больше смещены в направлении оси  $y$  при  $\bar{L}_{см}=3,0$ , чем при  $\bar{L}_{см}=1,0$  (например, кривые при  $x=0,075$  м;  $x=0,15$  м).

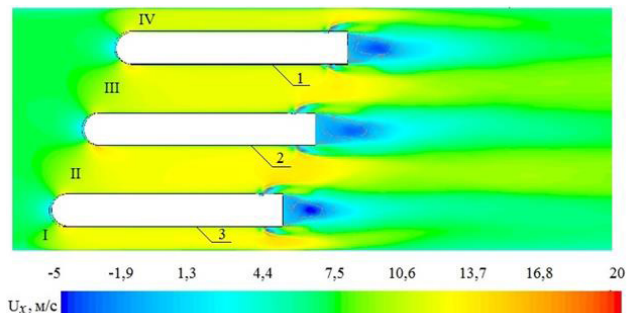


Рис. 2. Поле продольной составляющей вектора скорости в сечении XOY, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при  $\bar{L}_{см}=1,0$ ; 1, 2, 3 – первый, второй и третий стабилизаторы пламени; I, IV – пристеночные каналы; II, III – межстабилизаторные каналы

Что касается выравнивания полей скорости в канале по мере удаления от эшелонированной решетки стабилизаторов, то, как следует из полученных данных, при увеличении шага  $\bar{L}_{см}$  указанное выравнивание наблюдается на меньшем расстоянии от решетки. При этом это относится, прежде всего, к течению в нижней части канала горелочного устройства (рис. 5).

В табл. 3 представлены результаты расчетов по определению длин зон обратных токов  $L_{от}$  и максимальных по модулю значений скорости  $U_{max}$  в них

для закормовых областей стабилизаторов при разных значениях шага смещения стабилизаторов друг относительно друга по потоку. Как видно, при  $\bar{L}_{см}=1,0$  и 2,0 наибольшие длины зон обратных токов имеют место за центральными стабилизаторами пламени. При  $\bar{L}_{см}=3,0$  значение  $L_{от}$  оказывается максимальным для первого по потоку стабилизатора. При этом указанные максимальные значения  $L_{от}$  весьма близки по величине для всех рассмотренных шагов смещения стабилизаторов  $\bar{L}_{см}$ .

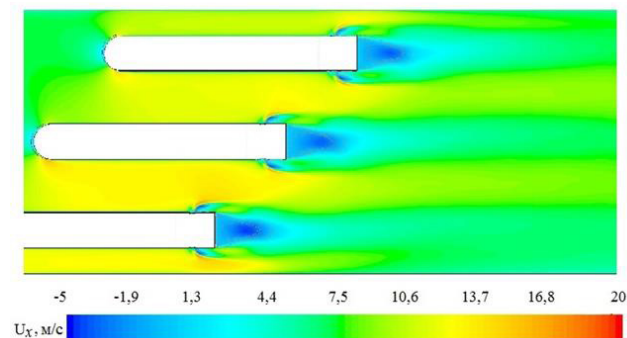


Рис. 3. Поле продольной составляющей вектора скорости в сечении XOY, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при  $\bar{L}_{см}=2,0$

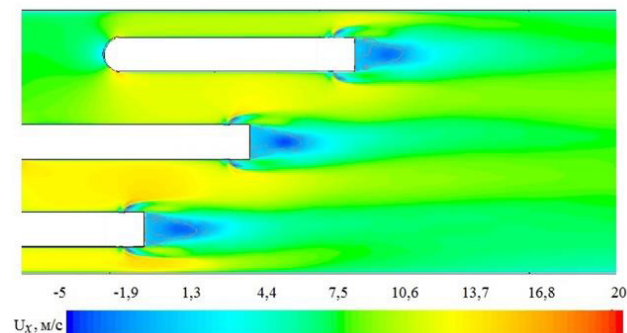


Рис. 4. Поле продольной составляющей вектора скорости в сечении XOY, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при  $\bar{L}_{см}=3,0$

На рис. 6–8 приведены поля среднеквадратичных пульсаций скорости  $\bar{U}'$  при разных значениях шагов смещения стабилизаторов пламени друг относительно друга по потоку. Согласно полученным данным величина  $\bar{L}_{см}$  существенно влияет как на максимальные уровни пульсаций  $\bar{U}'$ , так и на размеры зон в закормовых областях стабилизаторов, где эти уровни весьма высоки. С ростом  $\bar{L}_{см}$  указанные максимальные уровни снижаются, а размеры зон, в которых пульсации  $\bar{U}'$  имеют повышенные значения, сокращаются. Описанная картина связана, по-видимому, со следующими особенностями течения топлива и окислителя. На участках течения, где поток воздуха обтекает газовые струи, наблюдается его локальное ускорение, что является одним из важных факторов турбулизации потока в закормовых областях стабилизаторов. Как следует из рис. 2–4, по мере увеличения  $\bar{L}_{см}$  это ускорение стано-

вится менее ярко выраженным, поскольку газовые струи все больше смещаются друг относительно друга по потоку.

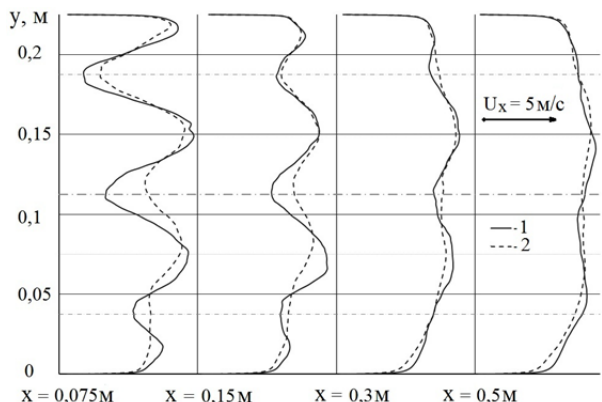


Рис. 5. Эпюры продольной составляющей  $U_x$  вектора скорости для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов при  $\bar{L}_{cm} = 1,0$  (линия 1),  $\bar{L}_{cm} = 3,0$  (линия 2) на фиксированном расстоянии  $x = const$  за последним по потоку стабилизатором

Таблица 3

Протяженность зон обратных токов  $L_{от}$  для разных стабилизаторов пламени ( $i=1, 2, 3$ ) и максимальные по модулю значения скоростей в этих зонах  $U_{max}$  для лестнично эшелонированной решетки при различных величинах шага смещения стабилизаторов пламени  $\bar{L}_{cm}$

Шаг смещения $\bar{L}_{cm}$	1,0			2,0			3,0			
	i	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$L_{от}, 10^{-3}M$		49,1	62,3	52,5	49,4	59,1	46,8	61,1	54,1	51,0
$U_{max}, M/c$		5,0	3,6	4,3	4,4	3,7	3,9	3,6	4,2	3,4

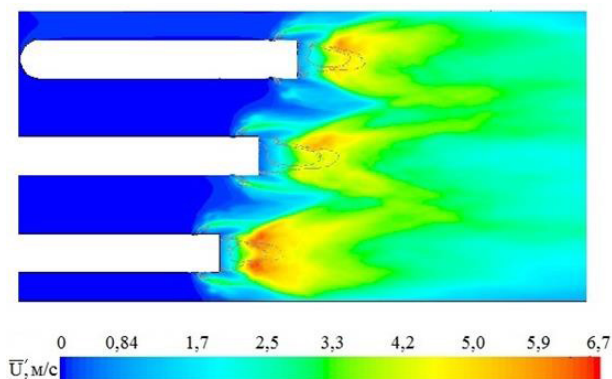


Рис. 6. Поле среднеквадратичных значений пульсаций скорости  $\bar{U}'$  в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при  $\bar{L}_{cm} = 1,0$

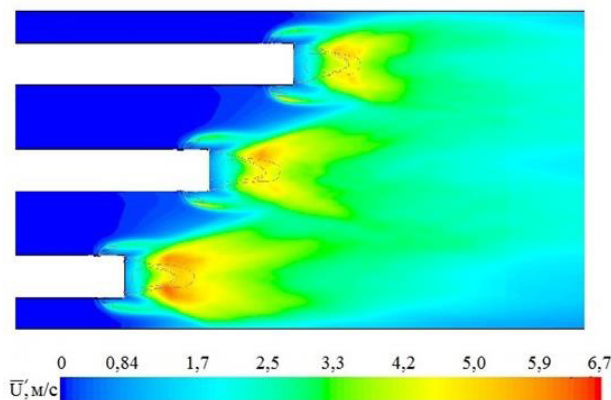


Рис. 7. Поле среднеквадратичных значений пульсаций скорости  $\bar{U}'$  в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при  $\bar{L}_{cm} = 2,0$

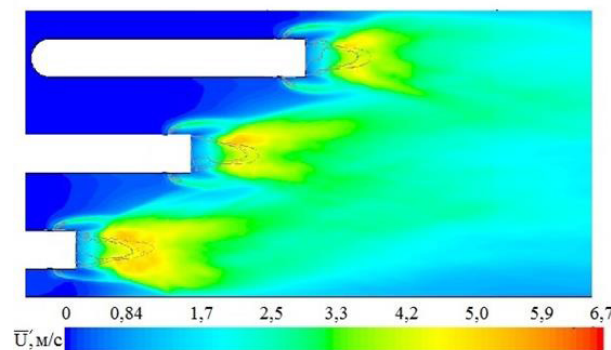


Рис. 8. Поле среднеквадратичных значений пульсаций скорости  $\bar{U}'$  в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при  $\bar{L}_{cm} = 3,0$

Результаты проведенных исследований показали также, что с увеличением  $L_{cm}$  уменьшаются потери давления  $\Delta P$  в горелочном устройстве. Так, при  $L_{cm} = 0$  они составляют 43,0 Па, а при  $\bar{L}_{cm} = 1,0; 2,0; 3,0$  снижаются до 41,2; 38,5 и 35,5 Па соответственно. То есть для рассматриваемой ситуации данные потери уменьшаются по сравнению с неэшелонированной решеткой стабилизаторов на 4,4 %; 11,7 % и 21,1 %.

## 6. Выводы

Выполнен комплекс математического моделирования по исследованию закономерностей влияния на характеристик течения величины шага смещения  $L_{cm}$  стабилизаторов пламени в лестнично эшелонированной стабилизаторной решетке микрофакельного горелочного устройства. При этом:

1) установлено, что с увеличением  $L_{cm}$  заметно повышается несимметричность течения в каналах стабилизаторной решетки;

2) определены длины зон обратных токов и максимальные по модулю значения скорости в них для закормовых областей стабилизаторов при варьировании величины  $L_{см}$ ;

3) показано, что величина  $L_{см}$  оказывает существенное влияние на уровни пульсаций скорости в ближнем следе стабилизаторов. Большим значениям

$L_{см}$  отвечают в целом меньшие уровни указанных пульсаций и размеры зон, в которых эти уровни достаточно высоки;

4) получены данные, свидетельствующие о том, что при увеличении  $L_{см}$  несколько снижаются потери давления в рассматриваемом стабилизаторном горелочном устройстве.

#### Литература

1. Любчик, Г. Н. Использование трубчатой технологии сжигания топлива в аппаратах и системах децентрализованного теплоснабжения [Текст] / Г. Н. Любчик, Г. А. Микулин, Г. Б. Варламов, Г. С. Марченко; под общей ред. Г. К. Вороновского, И. В. Недина. – В кн. «Малая энергетика в системе обеспечения экономической безопасности государства». – К.: Знання України, 2006. – С. 139–151.
2. Микулин, Г. А. Аэродинамические характеристики и массообменные свойства трубчатых интенсификаторов горения и стабилизаторов пламени [Текст] / Г. А. Микулин, Г. Н. Любчик // Энергетика: экономика, технология, экология. – 2004. – Т. 15, № 2. – С. 54–62.
3. Абдулин, М. З. Численное моделирование турбулентного теплообмена в горелочном устройстве на основе струйно-нишевой технологии сжигания топлива [Текст]: тр. 2-ой рос. конф. / М. З. Абдулин, С. А. Исаев, Д. А. Лысенко // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – С. 84–85.
4. Sjunnesson, A. LDA measurements of velocities and turbulence in a bluff body stabilized flame [Text] / A. Sjunnesson, C. Nelsson, M. Erland. – NUTEK Report, 1991. – P. 89–95.
5. Gran, I. R. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry [Text] / I. R. Gran, B. F. Magnussen // Combustion Science and Technology. – 1996. – Vol. 119, Issue 1-6. – P. 119–191. doi: 10.1080/00102209608951999
6. Грановська, О. О. Удосконалення стабілізаторних пальникових пристроїв при мікрофакельному спалюванні газу [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.14.14 "Теплові та ядерні енергоустановки" / О. О. Грановська. – Київ, 2014. – 26 с.
7. Раушенбах, Б. В. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей [Текст] / Б. В. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беспалов и др. – М.: Машиностроение, 1964. – 526 с.
8. Фиалко, Н. М. Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени [Текст] / Н. М. Фиалко, Л. С. Бутовский, В. Г. Прокопов и др. // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 6. – С. 28–36.
9. Фиалко, Н. М. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени [Текст] / Н. М. Фиалко, В. Г. Прокопов, Л. С. Бутовский и др. // Промышленная теплотехника. – 2011. – № 2. – С. 59–64.
10. Фиалко, Н. М. Влияние количества стабилизаторов пламени на особенности течения в эшелонированных стабилизаторных решетках [Текст]: сб. тр. / Н. М. Фиалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковский и др. // «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – Институт промышленной экологии. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2014. – С. 125–128
11. Фіалко, Н. М. Структура течії в мікрофакельних пальниках з ешелонованими решітками стабілізаторів подум'я [Текст] / Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковський та ін. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – № 194/3. – С. 107–113.
12. Фиалко, Н. М. Закономерности смесеобразования в эшелонированных решетках плоских стабилизаторов пламени [Текст] / Н. М. Фиалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковский и др. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.7. – С. 187–191.
13. Снегирев, А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численн ̄ моделирование турбулентных течений: учебное пособие [Текст] / А. Ю. Снегирев. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
14. Волков, К. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений [Текст] / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
15. Гарбарук, А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений [Текст]: уч. пос. / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
16. Spalart, P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations [Text] / P. R. Spalart // Jun 2000 in International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2000. – Vol. 21, Issue 3. – P. 252–263. doi: 10.1016/s0142-727x(00)00007-2
17. Ferziger, J. H. Recent Advances in Large Eddy Simulation [Text] / J. H. Ferziger, W. Rodi, G. Bergeles // Engineering Turbulence Modelling and Experiments. – 1996. – Vol. 3. – P. 163–176. doi: 10.1016/b978-0-444-82463-9.50022-8
18. Oran, E. S. Numerical Simulation of reactive flow [Text] / E. S. Oran, J. P. Boris. – Cambridge University Press, 2001. – 529 p. doi: 10.1017/cbo9780511574474.001
19. Grinstein, F. F. Implicit Large Eddy Simulation [Text] / F. F. Grinstein, L. G. Margolin, W. J. Rider. – Cambridge University Press, 2007. – 562 p. doi: 10.1017/cbo9780511618604
20. Spalart, P. R. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities [Text] / P. R. Spalart, S. Deck, M. L. Shur, K. D. Squires, M. Kh. Strelets, A. Travin // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. – 2006. – Vol. 20, Issue 3. – P. 181–195. doi: 10.1007/s00162-006-0015-0