

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.

канала подается воздух, который омывает наружные поверхности стенок стабилизаторов. Подвод газа к стабилизатору реализуется из газоподающего коллектора (4) через входное сечение Γ_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 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.

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; τ_{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; 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

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

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

где ρ_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 - ϵ 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 Δ и относительные δ 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	Δ , м/с	0,42	0,3	-0,22	-0,54
	δ , %	3,8	2,6	-1,9	-4,9
2,0	Δ , м/с	0,55	0,68	-0,32	-1,24
	δ , %	5,0	5,9	-2,8	-11,3
3,0	Δ , м/с	0,55	0,87	-0,38	-1,5
	δ , %	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).

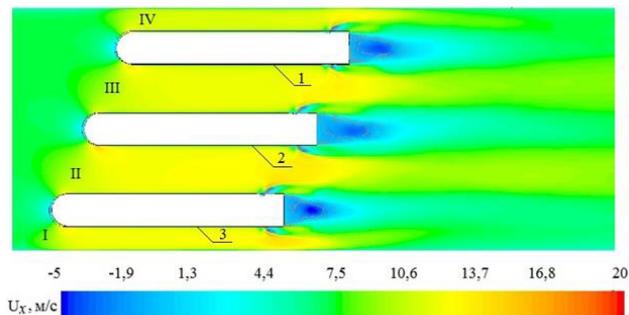


Рис. 2. Поле продольной составляющей вектора скорости в сечении XOY, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при $\bar{L}_{см}=1,0$; 1, 2, 3 – первый, второй и третий стабилизаторы пламени; I, IV – пристеночные каналы; II, III – межстабилизаторные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

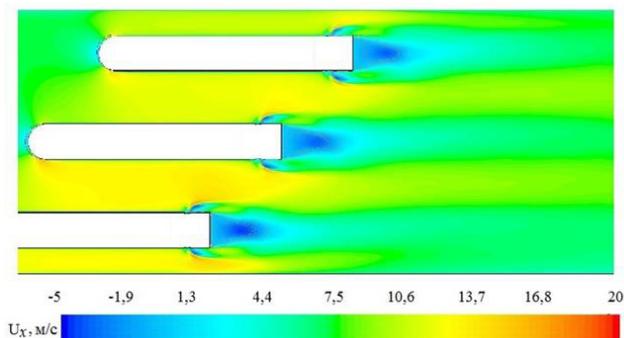


Рис. 3. Поле продольной составляющей вектора скорости в сечении XOY, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при $\bar{L}_{см}=2,0$

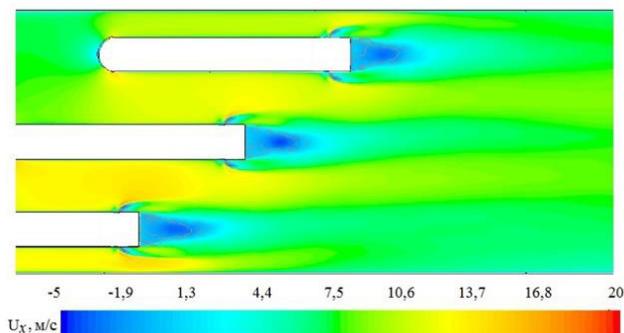


Рис. 4. Поле продольной составляющей вектора скорости в сечении XOY, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при $\bar{L}_{см}=3,0$

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.

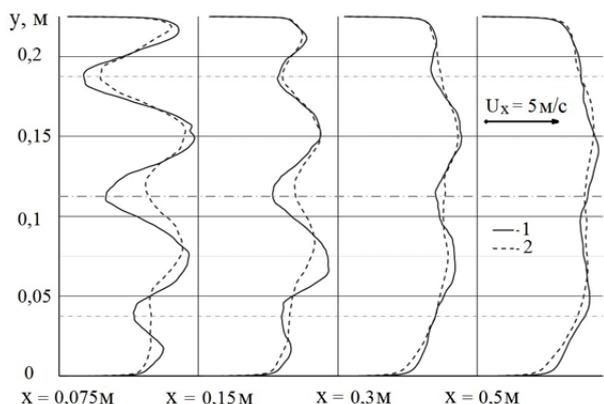


Рис. 5. Эпюры продольной составляющей U_x вектора скорости для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов при $\bar{L}_{см} = 1,0$ (линия 1), $\bar{L}_{см} = 3,0$ (линия 2) на фиксированном расстоянии $x = const$ за последним по потоку стабилизатором

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 $\bar{L}_{см}$

Шаг смещения $\bar{L}_{см}$	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

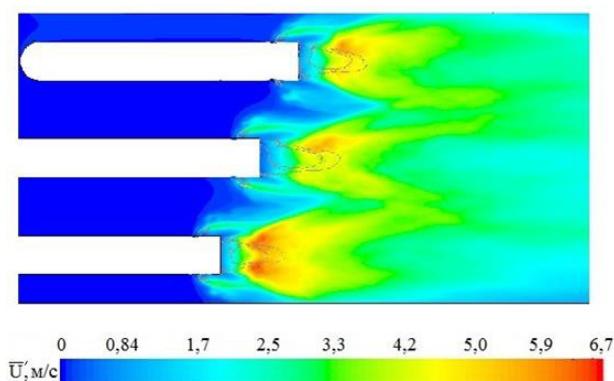


Рис. 6. Поле среднеквадратичных значений пульсаций скорости \bar{U}' в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при $\bar{L}_{см} = 1,0$

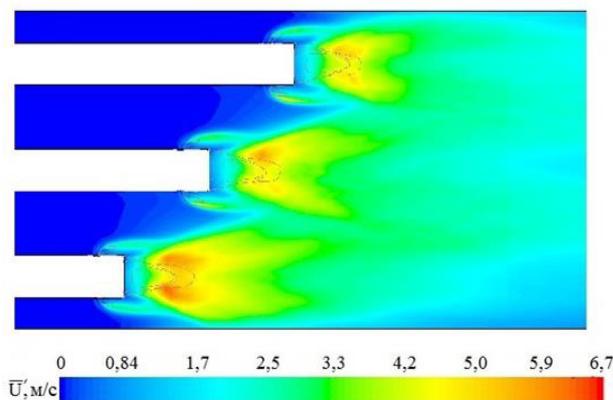


Рис. 7. Поле среднеквадратичных значений пульсаций скорости \bar{U}' в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при $\bar{L}_{см} = 2,0$

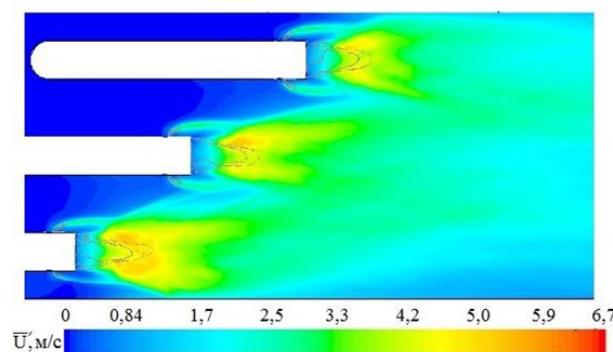


Рис. 8. Поле среднеквадратичных значений пульсаций скорости \bar{U}' в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при $\bar{L}_{см} = 3,0$

Результаты проведенных исследований показали также, что с увеличением $L_{см}$ уменьшаются потери давления ΔP в горелочном устройстве. Так, при $L_{см} = 0$ они составляют 43,0 Па, а при $\bar{L}_{см} = 1,0; 2,0; 3,0$ 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 $L_{см}$ стабилизаторов пламени в лестнично эшелонированной стабилизаторной решетке микрофакельного горелочного устройства. При этом:

1) установлено, что с увеличением $L_{см}$ 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