

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ
В ГОРЕЛКАХ С ЭШЕЛОНИРОВАННЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ
СТАБИЛИЗАТОРОВ ПЛАМЕНИ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И
ПРИ ГОРЕНИИ ТОПЛИВА**

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

Ю. В. Шеренковский, кандидат технических наук

В. Г. Прокопов, доктор технических наук

Н. О. Меранова, С. А. Алешко, кандидаты технических наук

А. Б. Тимощенко, Н. П. Полозенко, С. Н. Стрижеус, инженеры

Институт технической теплофизики НАН Украины,

г. Киев

e-mail: nmfialko@ukr.net

Аннотация. *Приведены результаты компьютерного моделирования структуры течения в горелках с лестнично эшелонированными решетками стабилизаторов пламени для изотермических условий и реагирующих потоков. Проанализированы основные отличия характеристик течения в сопоставляемых ситуациях. При этом особое внимание уделено рассмотрению специфики течения в каналах стабилизаторной решетки и в закормовых областях стабилизаторов.*

Ключевые слова: *эшелонирование стабилизаторов пламени, изотермическое течение, горение топлива, компьютерное моделирование*

Сжигание топлива в горелках с эшелонированными решетками стабилизаторов пламени обладает целым рядом известных преимуществ [1–4]. К основным из них относится возможность формирования требуемых профилей температуры в зоне горения, снижения потерь давления в горелочном устройстве, устранения спонтанного нарушения симметрии течения и пр.

Задачи конструирования горелочных устройств указанного типа требуют углубленных исследований структуры течения в них топлива и окислителя. При этом особый интерес представляет проведение сопоставления характеристик течения в условиях горения и холодного потока.

Цель исследований – выявление эффектов влияния неизотермичности потока на характеристики течения в лестнично эшелонированных решетках стабилизаторов пламени микрофакельных горелочных устройств.

Материалы и методика исследований. Рассмотрению подлежит структура течения природного газа, воздуха и продуктов горения в стабилизаторном горелочном устройстве с лестнично эшелонированной решеткой стабилизаторов пламени (рис. 1).

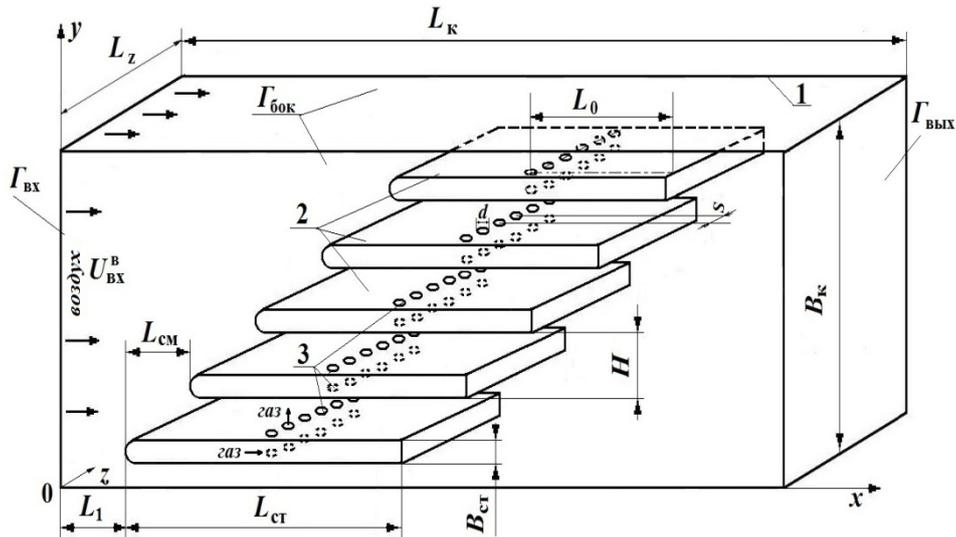


Рис. 1. Схема горелочного устройства с лестнично эшелонированной решеткой стабилизаторов пламени:
 1 – плоский канал; 2 – стабилизаторы пламени; 3 – газоподающие отверстия

Математическая модель исследуемых процессов, включающая уравнение движения, неразрывности, энергии для реагирующих турбулентных потоков, уравнение сохранения массы компонент смеси и уравнение состояния многокомпонентной смеси, имеет вид:

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

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

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

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

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

где τ – время;
 U – вектор скорости;
 P – статическое давление;

S^* – тензор напряжений;

ρ – плотность;

I – энтальпия;

q_Σ – тепловой поток, включающий составляющие, которые связаны с теплопроводностью и турбулентными пульсациями;

q_V – источниковый член, учитывающий теплоту химических реакций и перенос теплоты излучением;

Y_i, M_i – массовая концентрация и молекулярная масса i -ой компоненты;

J_i – поток массы i -ой компоненты, обусловленный диффузией и турбулентным переносом;

R_i – источниковый член, учитывающий скорость образования i -ой компоненты;

N – количество компонент смеси;

T – абсолютная температура;

R – универсальная газовая постоянная.

Что касается граничных условий для приведенной системы уравнений, то они определялись таким образом. В сечениях, отвечающих входу в канал горелочного устройства и газоподающие отверстия, задавались постоянные значения скоростей, концентраций и температур. В выходном сечении $\Gamma_{\text{вых}}$ ставились так называемые мягкие граничные условия – равенство нулю производных в продольном направлении от зависимых переменных. На твердых поверхностях задавались условия прилипания и непроницаемости. Боковые поверхности канала считались адиабатическими.

Решение поставленной задачи осуществлялось на основе подхода *DES*, который представляет собой комбинацию *RANS* и *LES* моделей и объединяет их лучшие качества.

Что касается выбора модели турбулентного переноса, то, согласно выполненным исследованиям, рассматриваемой ситуации в наибольшей мере отвечает k - ϵ *realizable* модель турбулентности.

Результаты исследований. Ниже приведены характерные результаты компьютерного моделирования, отвечающие лестнично эшелонированной стабилизаторной решетке, состоящей из трех стабилизаторов пламени, при следующих исходных данных: скорость воздуха на входе в канал $U_{\text{вх}}^{\text{B}} = 6,8$ м/с; скорость газа на входе в газоподающие отверстия $U_{\text{вх}}^{\text{Г}} = 24$ м/с; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$; геометрические характеристики горелочного устройства $L_1 = 0,2$ м; $L_{\text{СТ}} = 0,215$ м; $L_{\text{К}} = 1,5$ м; $H = 0,075$ м; $B_{\text{К}} = 0,225$ м; $B_{\text{СТ}} = 0,03$ м; $L_{\text{СМ}} = 0,06$ м; $L_0 = 0,05$ м; $d = 0,0043$ м; $S/d = 3,72$, коэффициент загромождения стабилизаторами проходного сечения канала $k_f = 0,3$; топливо – природный газ, окислитель – воздух.

Как показали результаты исследований, картина течения в изотермических и неизотермических условиях является существенно различной, что, как очевидно, в значительной мере связано с тепловым расширением газов в условиях горения.

При горении, в сравнении с изотермическим течением, имеет место противоположный характер перераспределения расходов воздуха в каналах решетки (см. табл. 1). В изотермических условиях в каналах решетки, прилежащих к первому по потоку стабилизатору, средние скорости заметно превышают их значения в каналах, прилежащих к последнему по потоку стабилизатору. В условиях горения наблюдается обратная картина. Это обусловлено значительным повышением статического давления в закормовых областях стабилизаторов и, прежде всего, за первым из них по потоку.

Как видно из табл. 1, при изотермическом течении средняя скорость в первом по потоку пристеночном канале оказывается выше, чем во втором по потоку пристеночном канале, на 19 %. В условиях горения, напротив, данная скорость оказывается выше во втором пристеночном канале, по сравнению с первым по потоку каналом, на 24 %.

1. Средние значения продольной составляющей U_x вектора скорости в каналах лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов при горении и в условиях изотермического течения, м/с

Условия течения	Номер канала			
	I	II	III	IV
Неизотермические (при горении)	9,38	11,08	12,44	11,63
Изотермические	11,83	12,17	10,95	9,93

Что касается уровня скоростей за стабилизаторной решеткой, то здесь обращает на себя внимание то, что при горении они существенно превышают данные уровни в случае изотермического течения. Так, эти скорости не превышают 13 м/с в условиях изотермического течения и могут достигать 35 м/с при горении.

Как следует из результатов компьютерного моделирования, в условиях горения значения скоростей за разными стабилизаторами пламени существенно различны. А именно: в целом наиболее высокие скорости имеют место за первым по потоку стабилизатором, меньшие – за вторым и наиболее низкие – за третьим. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, горение за первым по потоку стабилизатором начинается выше по течению, и, соответственно, вследствие теплового расширения газов, ускорение потока проявляется здесь в большей степени. Во-вторых, ввиду описанного выше перераспределения расходов воздуха в стабилизаторной решетке, значения коэффициентов избытка воздуха за первым по потоку стабилизатором оказываются меньшими по величине, чем за вторым и третьим стабилизаторами.

Это также обуславливает более высокие уровни ускорения потока за первым по течению стабилизатором ввиду повышенных температур в данной зоне.

Таким образом, характер поля скоростей за стабилизаторной решеткой, в случае реагирующих потоков, коррелируется определенным образом с соответствующим полем температур.

В табл. 2 приведены результаты исследований, касающиеся протяженности зон обратных токов в закормовых областях стабилизаторов и максимальных по модулю значений скоростей в этих зонах для условий изотермического и неизотермического течения. Согласно приведенным данным, протяженности зон обратных токов $L_{от}$ при горении несколько увеличиваются, что связано с повышением статического давления в закормовых областях следа. Что же касается указанных максимальных значений скорости, то они повышаются при горении весьма существенно. Так, для первого, второго и третьего по потоку стабилизатора они увеличиваются примерно в 1,6; 1,8 и 1,6 раза соответственно.

2. Протяженность зон обратных токов $L_{от}$ для разных стабилизаторов пламени ($i = 1, 2, 3$) при лестничном их расположении и максимальные по модулю значения скорости в этих зонах U_{max} при горении и в условиях изотермического течения

Параметры	Условия течения	i		
		1	2	3
$L_{от}, 10^{-3} \text{ м}$	Неизотермические (горение)	34	37	40
	изотермические	33	29	33
$U_{max}, \text{ м/с}$	Неизотермические (горение)	9,18	8,70	6,73
	изотермические	5,78	4,76	4,28

На рис. 2 представлены поля среднеквадратичных значений пульсаций скорости при горении и для холодного потока. Как видно, уровни пульсаций скорости в закормовых областях стабилизаторов при горении в целом существенно выше. Так, они достигают 11,8 м/с в условиях горения и 8,9 м/с – в холодном потоке. При этом размеры зон с повышенным уровнем пульсаций скорости за стабилизаторами заметно увеличиваются в случае реагирующих потоков.

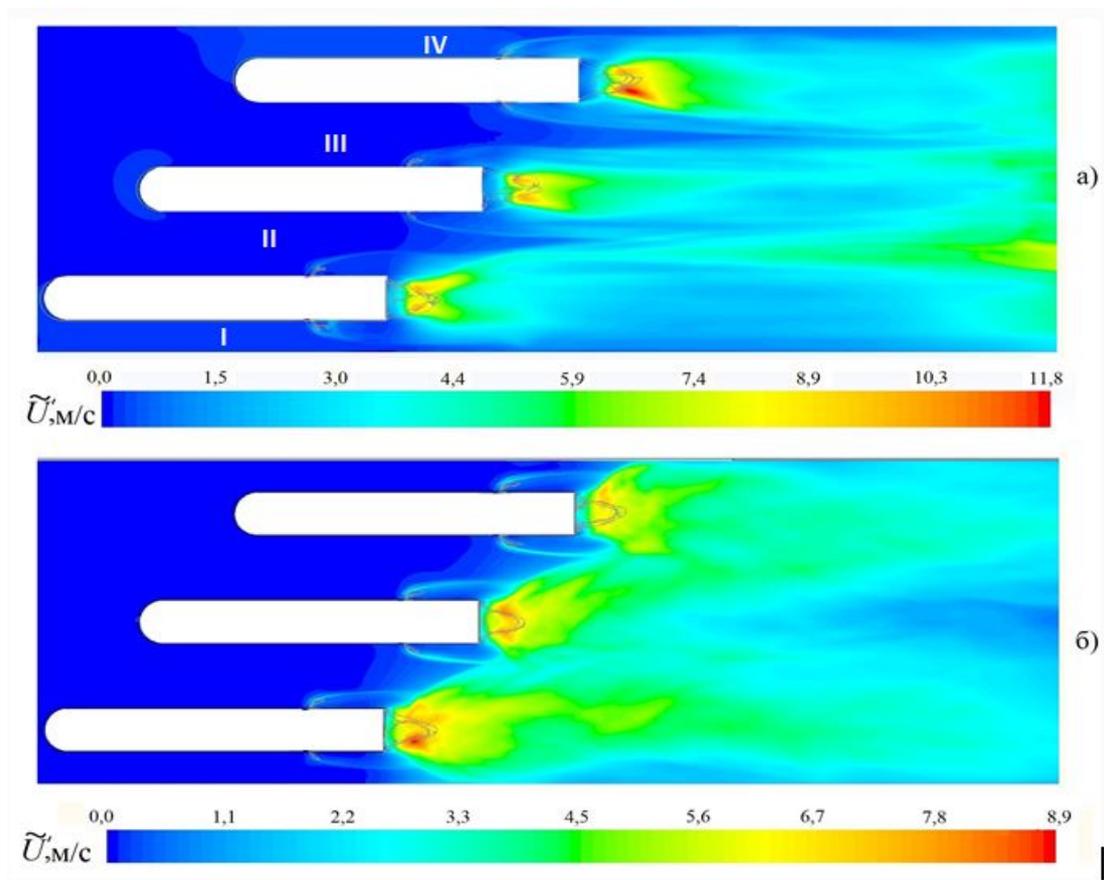


Рис. 2. Поля среднеквадратичных значений пульсаций скорости \tilde{U}' в сечении, проходящем через центры газоподающих отверстий, для лестнично эшелонированной решетки стабилизаторов пламени при горении (а) и в изотермических условиях (б)

Обращает на себя внимание также тот факт, что размеры указанных зон за стабилизаторами, в условиях холодного потока, ранжируются следующим образом. Наибольшими они оказываются за первым по потоку стабилизатором, а наименьшие – за последним. При этом максимальные уровни пульсаций в данных зонах также отвечают первому по потоку стабилизатору, а минимальные – последнему.

В условиях горения картина соотношения размеров зон с повышенным уровнем пульсаций скорости за разными стабилизаторами оказывается обратной описанной выше. Это, очевидно, связано с особенностями перераспределения расходов воздуха в стабилизаторной решетке для сопоставляемых ситуаций.

Что касается потерь давления в горелочном устройстве, то в случае реагирующих потоков они существенно повышаются. В рассматриваемых условиях данные потери увеличились более чем в 5 раз.

Проведенные исследования показали также, что за счет эшелонирования стабилизаторов достигается снижение потерь давления в горелочном устройстве. В исследуемой ситуации это снижение составило 12% и 8% соответственно, в условиях изотермического и неизотермического течения.

Выводы

Выполненные исследования структуры течения в лестнично эшелонированной решетке стабилизаторов пламени в ситуациях, отвечающих холодному потоку и условиям горения, показали, что в последнем случае имеет место существенное ускорение и турбулизация потока за решеткой стабилизаторов пламени, реализуется противоположный холодному потоку характер перераспределения расходов воздуха в каналах решетки и значительно повышаются потери давления в горелочном устройстве.

Список литературы

1. 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.
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. Раушенбах Б. В. 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.
4. Фиалко Н. М. Особенности течения в микрофакельных горелках с подковообразным расположением стабилизаторов пламени / Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, В. Г. Прокопов и др. // Науковий вісник НУБіП України. – 2015. – Вип. 209, ч.1. – С. 191–199.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧІЇ У ПАЛЬНИКАХ З ЕШЕЛОНОВАНИМ РОЗТАШУВАННЯМ СТАБІЛІЗАТОРІВ ПОЛУМ'Я В ІЗОТЕРМІЧНИХ УМОВАХ І ПІД ЧАС ГОРІННЯ ПАЛИВА

*Н. М. Фіалко, Ю. В. Шеренковський, В. Г. Прокопов,
Н. О. Меранова, С. А. Альошко, А. Б. Тимощенко,
Н. П. Полозенко, С. Н. Стрижеус*

Анотація. *Наведено результати комп'ютерного моделювання структури течії в пальниках зі ступінчато ешелонованими решітками стабілізаторів полум'я для ізотермічних умов і реагуючих потоків. Проаналізовано основні відмінності характеристик течії в ситуаціях, що зіставляються. При цьому особливу увагу приділено розгляду специфіки течії в каналах стабілізаторної решітки і в закормових областях стабілізаторів.*

Ключові слова: *ешелонування стабілізаторів полум'я, ізотермічна течія, горіння палива, комп'ютерне моделювання*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FLOW CHARACTERISTICS
IN BURNER WITH ECHELONED POSITIONING OF THE FLAME
STABILIZER UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS
AND FUEL BURNING**

***N. Fialko, Y. Sherenkovsky, V. Prokopov, N. Meranova,
S. Aleshko, A. Tymoschenko, N. Polozenko, S. Stryzheus***

Annotation. *The results of computer simulation of the flow structure in the burners with a staircase echeloned grids of flame stabilizers for isothermal conditions and reacting flows are presented. The main differences between the flow characteristics in the comparable situations are discussed. Special attention is paid to the specifics of the flow in the channels of the stabilizer grad and in astern areas of stabilizers.*

Key words: *separation of the flame stabilizers, isothermal flow, fuel burning, computer simulation*