

УДК 536.24:533

Фиалко Н.М.^{1,2}, Прокопов В.Г.¹, Бутовский Л.С.², Шеренковский Ю.В.¹,
 Меранова Н.О.¹, Алёшко С.А.¹, Полозенко Н.П.¹

¹Институт технической теплофизики НАН Украины²Национальный технический университет Украины «КПИ»

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ТОПЛИВА И ОКИСЛИТЕЛЯ ПРИ ЭШЕЛОНИРОВАННОМ РАСПОЛОЖЕНИИ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПЛАМЕНИ

Представлено результати комп'ютерного моделювання течії палива та окислювача в ешелонуваний решітці плоских стабілізаторів полум'я. Виконано зіставлення характеристик течії при ешелонованому та відповідному неешелонованому розташуванні стабілізаторів. Наведено дані порівняльного аналізу картини течії за наявності і відсутності струменевої подачі природного газу в потік, що зносить.

Представлены результаты компьютерного моделирования течения топлива и окислителя в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени. Выполнено сопоставление характеристик течения при эшелонированном и соответствующем неэшелонированном расположении стабилизаторов. Приведены данные сравнительного анализа картины течения при наличии и отсутствии струйной подачи природного газа в сносящий поток воздуха.

Results of computer modeling of fuel and oxidizer current in an echeloning lattice of flat flame stabilizers are presented. Comparison of characteristics of a current in echeloning and nonecheloning arrangements of stabilizers is fulfilled. The data on the comparative analysis of a flow picture with and without natural gas jet supplying in blowing off air stream are shown.

$B_{ст}$ – ширина стабилизатора;
 d – диаметр газоподающих отверстий;
 D_i – коэффициент диффузии i -го компонента;
 k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;
 k_f – коэффициент загромождения проходного сечения канала, $k_f = B_{ст} / H$;
 H – шаг расположения стабилизаторов;
 \bar{J}_i – диффузионный поток i -го компонента;
 L – длина;
 N – число компонентов смеси;
 p – статическое давление;
 S – шаг расположения газоподающих отверстий;
 S_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций;
 Sc_t – турбулентное число Шмидта;

Tu – степень турбулентности;
 V – скорость;
 Y_i – массовая доля i -го компонента;
 α – коэффициент избытка воздуха;
 δ_{ij} – символ Кронекера;
 μ, μ_t – молекулярная и турбулентная динамическая вязкость;
 ρ – плотность среды;
 τ – тензор напряжений.

Индексы верхние:

v – воздух;
 $г$ – газ.

Индексы нижние:

$вх$ – вход;
 $от$ – зона обратных токов;
 $ст$ – стабилизатор;
 max – максимальное значение.

Введение

Различным аспектам микрофакельного сжигания топлива с формированием факела за системой стабилизаторов пламени в последний период посвящается значительное количество исследований (см., например, [1-6]). При этом

большое внимание уделяется анализу различных способов воздействия на протекание рабочих процессов в микрофакельных конструкциях стабилизаторного типа. Одним из таких способов является применение эшелонированного расположения стабилизаторов в решетке.

Особый интерес представляет рассмотрение ситуации, когда указанное эшелонирование используется для обеспечения относительно короткого факела при горении. Как известно, в горелочных устройствах стабилизаторного типа уменьшение длины факела может быть достигнуто за счет увеличения коэффициента загромождения k_f проходного сечения канала. В этом случае при фиксированном общем расходе природного газа уменьшается его расход, приходящийся на один стабилизатор, и соответственно, сокращается длина факела. Однако, при достаточно больших значениях k_f и расположении стабилизаторов без эшелонирования возникает так называемое спонтанное нарушение симметрии течения, которое носит случайный характер и в большой мере непредсказуемо, что может приводить к существенной неравномерности выгорания топлива по длине огнетехнического устройства и значительному увеличению протяженности зоны горения. При наличии же эшелонирования стабилизаторов отмеченная непредсказуемость течения устраняется. В такой физической обстановке длины зон обратных токов в ближнем следе за эшелонированными стабилизаторами и, в целом, поле скоростей характеризуются вполне определенной регулярной неравномерностью. Как следствие, в этом случае обеспечивается возможность получения требуемой относительно небольшой длины факела.

С другой стороны эшелонирование стабилизаторов может быть использовано в качестве средства воздействия на формирование необходимого поля температур в зоне горения в целом и, прежде всего, в поперечном сечении потока непосредственно за горелочным устройством. В зависимости от требований, предъявляемых к картине температурного поля продуктов сгорания, могут быть реализованы различные конструктивные схемы эшелонирования стабилизаторов, а именно, их полное или частичное эшелонирование. Так, например, последнее применимо для ситуаций, когда возникает необходимость обеспечения повышенного уровня температур в зонах огнетех-

нического устройства, находящихся в непосредственной близости от крайних стабилизаторов решетки. В этом случае указанный крайний стабилизатор должен быть смещен вниз по потоку с тем, чтобы в его ближнем следе имел место механизм горения, близкий к кинетическому, и соответственно, реализовывался короткий высокотемпературный факел. В остальных же несмещенных стабилизаторах такой решетки может быть обеспечен промежуточный механизм горения с преобладанием диффузионного и, соответственно, более длинный факел со смещенной вниз по потоку зоной максимальных температур.

Следует отметить, что в качестве средства формирования требуемых закономерностей температурных полей продуктов сгорания без эшелонирования стабилизаторов может быть также использовано эшелонированное расположение газоподающих отверстий. Однако, в этом случае остается нерешенной отмеченная выше проблема спонтанного нарушения симметрии течения, характерного для больших значений коэффициента загромождения k_f .

Таким образом, ввиду широких возможностей использования эшелонированных решеток стабилизаторов пламени как средства воздействия на различные характеристики рабочих процессов в рассматриваемых горелочных устройствах актуальными являются исследования картины течения в данной физической ситуации.

Постановка задачи и методика проведения исследований

Настоящая работа посвящена математическому моделированию структуры течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени в горелочных устройствах с подачей газа внедрением в воздушный поток через систему отверстий, находящихся на боковых плоскостях стабилизаторов (рис. 1). При этом в задачу исследования входило проведение сравнительного анализа картины течения при эшелонированном и соответствующем неэшелонированном расположении стабилизаторов. Подлежали также

сопоставлению физические ситуации, отвечающие условиям наличия и отсутствия струйной подачи газа.

Математическая модель исследуемого процесса представима в виде

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

где $\vec{J}_i = -\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i$; компоненты тензора напряжений $\tau_{ij} = 2(\mu + \mu_T) S_{ij} - \frac{2}{3} [(\mu + \mu_T) \nabla \cdot \vec{V} + \rho \cdot k] \delta_{ij}$.

Замыкание системы уравнений (1) – (3) осуществлялось с применением RNG k - ϵ модели турбулентности, обоснование использования которой базировалось на сравнении с резуль-

татами соответствующих экспериментальных данных. Для реализации решения сформулированной задачи использовался пакет прикладных программ FLUENT.

Расчетная область включала в себя два характерных элемента стабилизаторов, смещенных относительно друг друга по потоку. Геометрические характеристики каждого из этих элементов следующие: длина $L_3 = L_K$, высота $H_3 = H/2$, ширина $S_3 = S/2$.

На боковых границах расчетной области задавались условия симметрии, а на омываемых поверхностях элементов двух рассматриваемых стабилизаторов – условия прилипания. Во входном сечении канала скорость воздуха V_{BX}^B принималась постоянной, а степень турбулентности равной Tu_{BX}^B , в выходном сечении ставились «мягкие» граничные условия. Что же касается газоподающих отверстий, то здесь задавались скорость V_{BX}^G и степень турбулентности Tu_{BX}^G .

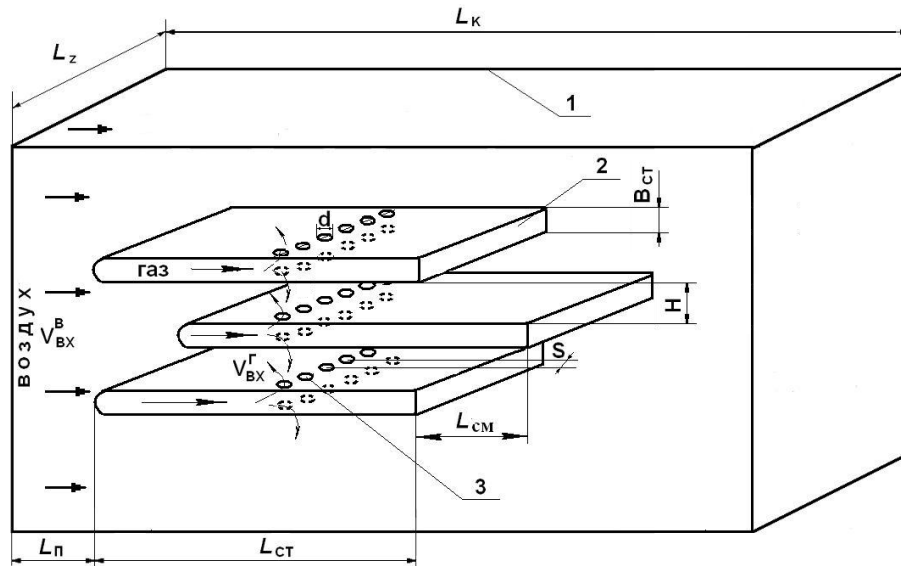


Рис. 1. Схема эшелонированного расположения стабилизаторов в стабилизаторной решетке: 1 – плоский канал; 2 – стабилизатор; 3 – газоподающее отверстие.

Результаты исследований и их анализ

Рассмотрим вначале результаты исследований, касающихся сопоставления особенностей течения в эшелонированной решетке стабилизаторов при наличии и отсутствии струй газа, внедряемых в сносящий поток. Приводимые

далее в качестве характерного примера данные отвечают следующим значениям исходных параметров: $B_{CT} = 0,03$ м; $L_{CT} = 0,22$ м; $L_K = 0,665$ м; $L_N = 0,05$ м; расстояние между срывной кромкой стабилизатора и центрами газоподающих отверстий для первого и второго по потоку ста-

билизатора составляло 0,025 м и 0,12 м соответственно; $L_{см} = 0,095$ м; шаг расположения стабилизаторов $H = 0,0666$ м, что отвечает коэффициенту загромождения проходного сечения канала $k_f = 0,45$; $d = 0,002$ м; $S/d = 6,0$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$; скорость воздуха на входе в канал $V_{BX}^B = 7,0$ м/с; скорость газа на входе в газоподающие отверстия $V_{BX}^Г = 86,0$ м/с.

Струйная подача газа обуславливает существенную трехмерность течения и, соответственно, его более сложный характер в целом. Как видно из рис. 2, наибольшие отличия в закономерностях течения для сопоставляемых ситуаций имеют место в подобласти, непосредственно прилежащей к газоподающим отверстиям. Что же касается зон циркуляции в ближнем следе за стабилизаторами, то здесь для обоих рассматриваемых случаев картины течения в качественном отношении оказываются весьма сходными. Однако, количественные характеристики течения в этих зонах могут заметно отличаться. При наличии струйной по-

дачи газа в основной части зон рециркуляции увеличивается степень разрежения. Соответственно этому уменьшаются длины зон обратных токов $L_{от}$ и возрастают максимальные скорости V_{max} в данных зонах. Это обстоятельство иллюстрируют результаты математического моделирования, приведенные в табл. 1. Здесь индекс i относит величины соответственно к первому ($i = 1$) и второму ($i = 2$) по ходу течения стабилизатору; значение $i = 0$ отвечает ситуации отсутствия взаимного смещения стабилизаторов.

Как видно из таблицы, указанный эффект изменения величин $L_{от}$ и V_{max} в связи со струйной подачей газа проявляется в несколько большей мере для второго по ходу течения стабилизатора. При этом величина изменения V_{max} (ее возрастание) оказывается большей, чем изменение $L_{от}$ (ее уменьшение) как для первого, так и для второго по потоку стабилизаторов. Так, значения $L_{от}$ и V_{max} изменяются при наличии струй газа, соответственно, в 1,24 и 1,38 раза для первого стабилизатора и в 1,3 и 1,46 раза для второго по ходу течения стабилизатора.

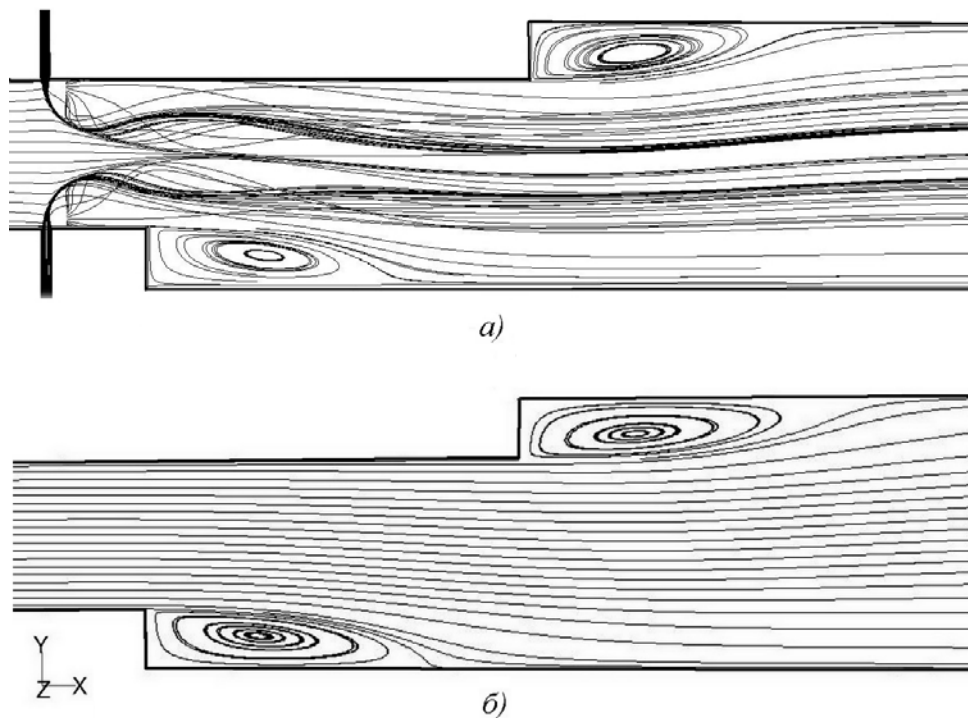


Рис. 2. Картина линий тока для эшелонированного расположения стабилизаторов при наличии (а) и отсутствии (б) струйной подачи газа.

Табл. 1. Протяженность зон обратных токов $L_{от}$ и значения максимальных по абсолютной величине скоростей V_{max} в этих зонах при наличии и отсутствии эшелонированного расположения стабилизаторов

i	Наличие струйной подачи газа			Отсутствие струйной подачи газа		
	0	1	2	0	1	2
$L_{от_i}, 10^{-3}$ м	60,9	57,2	60,0	71,1	71,2	77,8
$V_{max_i},$ м/с	3,24	3,37	2,54	2,05	2,44	1,74

Анализ приведенных в табл. 1 данных свидетельствует также о том, что в обеих рассматриваемых ситуациях, отвечающих наличию и отсутствию струйной подачи газа, общие закономерности, касающиеся соотношения характеристик течения за первым и вторым по потоку стабилизаторами, оказываются одинаковыми. А именно, для первого из них несколько меньшими являются протяженности зоны обратных токов $L_{от}$ при больших значениях V_{max} .

Остановимся далее вкратце на сопоставлении данных, отвечающих эшелонированному и неэшелонированному расположению стабилизаторов в условиях наличия струйной подачи газа. Здесь при отсутствии смещения стабилизаторов друг относительно друга расстояние L_1 между срывной кромкой и газоподающими отверстиями составляло $25 \cdot 10^{-3}$ м. Это отвечает местоположению отверстий для первого по потоку стабилизатора в эшелонированной стабилизаторной решетке. Исследования показали, что, несмотря на существенные отличия сопоставляемых постановок задачи, тем не менее, картина течения в ближнем следе за первым по потоку стабилизатором эшелонированной решетки и при отсутствии эшелонирования оказывается весьма близкой как в качественном, так и в количественном отношении (см. данные в табл. 1). По-видимому, это объясняется тем, что при эшелонированном расположении стабилизаторов струи газа как бы экранируют гидродинамическое воздействие второго по потоку стабилизатора на картину течения в зоне циркуляции первого стабилизатора. Таким образом, здесь наблюдается эффект относительной локализации влияния особен-

ностей течения вблизи второго стабилизатора на характеристики течения в закормовой зоне первого стабилизатора.

Причем, что следует особо подчеркнуть, данный эффект, как очевидно, может проявиться только при определенном сочетании условий однозначности и, в первую очередь, при определенных соотношениях значений скоростей V_{BX}^B и $V_{BX}^Г$.

Выводы

В работе представлены результаты математического моделирования картины течения топлива и окислителя в горелочных устройствах стабилизаторного типа при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени. При этом:

1. Выполнен сравнительный анализ характеристик течения в условиях, когда имеет место и отсутствует струйная подача природного газа в сносящий поток воздуха. Установлено, что при наличии такой подачи в зоне циркуляции за стабилизаторами увеличивается степень разрежения и, как следствие, уменьшаются протяженности $L_{от}$ этих зон и возрастают максимальные по абсолютной величине значения скорости V_{max} в них. Показано также, что для обеих рассматриваемых ситуаций длины зон циркуляции $L_{от}$ оказываются меньшими для первого по потоку стабилизатора при существенно больших по абсолютной величине значениях V_{max} .

2. Проведено сопоставление данных математического моделирования для эшелонированных и неэшелонированных стабилизаторных решеток при наличии струйной подачи природного газа. Показано, что при определенном

сочетании параметров характеристики течения в зоне обратных токов первого по потоку стабилизатора в эшелонированной решетке являются близкими к условиям, когда такое эшелонированное расположение отсутствует. То есть, обнаружено явление относительной пространственной локализации влияния специфики течения в подобласти, прилежащей ко второму смещенному вниз по потоку стабилизатору, на картину течения в закормовой области первого стабилизатора. Предложена интерпретация отмеченного явления, согласно которой в случае эшелонированного расположения стабилизаторов наблюдается эффект частичного аэродинамического экранирования газовыми струями влияния второго по потоку стабилизатора на характеристики циркуляционной зоны первого стабилизатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алёшко С.А., Полозенко Н.П.* Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха // Пром. теплотехника. – 2011, №1. – С. 51-56.
2. *Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Грановская Е.А., Шеренковский Ю.В., Алёшко С.А., Коханенко П.С.* Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком // Пром. теплотехника. – 2010, № 5. – С. 26-33.
3. *Микулин Г.А., Любчик Г.Н.* Аэродинамические характеристики и массообменные свойства трубчатых интенсификаторов горения и стабилизаторов пламени // Энергетика: экономика, технология, экология. – 2004. – Т. 15, № 2. – С. 54-62.
4. *Любчик Г.Н., Микулин Г.А., Варламов Г.Б., Марченко Г.С.* Использование трубчатой технологии сжигания топлива в аппаратах и системах децентрализованного теплоснабжения // В кн. «Малая энергетика в системе обеспечения экономической безопасности государства» / Под общей ред. Вороновского Г.К., Недина И. В. – К.: Знания Украины, 2006. – С. 139-151.
5. *Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Фиалко Н.М.* Пусковые характеристики горелочных устройств стабилизаторного типа с подачей топлива в сносящий воздушный поток // Технологические системы. – 2010, № 4. – С. 32-37.
6. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алёшко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Коханенко П.С.* Математическое моделирование структуры течения при микрофакельном сжигании топлива // Мат. XVIII межд. конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – Ялта, 10-14 июня 2008 г. – Киев, 2008. – С. 112-114.

Получено 09.03.2011 г.