

**ВЛИЯНИЕ ШАГА МЕЖДУ ГАЗОВЫМИ СТРУЯМИ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ В СТАБИЛИЗАТОРНЫХ  
ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

**Ю.В.Шеренковский, кандидат технических наук**  
**Н.М. Фиалко, доктор технических наук, член-корр. НАН Украины**  
**Г.В. Иваненко, кандидат технических наук**  
**Н.Н. Ольховская, Е.И. Милко, А.А. Озеров, научные сотрудники**  
**О.Н. Кутняк, В.С. Новицкий, Л.А. Швецова, младшие научные**  
**сотрудники**  
**М.И. Дончак, главный конструктор**  
**Институт технической теплофизики НАН Украины**

*Приведены результаты компьютерного моделирования по установлению закономерностей влияния шага между газовыми струями на характеристики течения в стабилизаторных горелочных устройствах со струйной подачей топлива в сносящий поток окислителя. Особое внимание уделено рассмотрению эффектов влияния этого шага на величину глубины проникновения газовых струй в поперечный поток, протяженность зон обратных токов за стабилизатором, значения максимальных скоростей в этих зонах и пр.*

***Струя в сносящем потоке, микрофакельные горелочные устройства, шаг между струями, математическое моделирование.***

В энергетическом оборудовании широко используются современные микрофакельные горелочные устройства со струйной подачей газа внедрением в сносящий поток окислителя через системы отверстий на боковых поверхностях стабилизаторов. Это обстоятельство определяет актуальность углубленных исследований процессов переноса в данных горелочных устройствах. В частности, важным является установление закономерностей течения топлива и окислителя в горелках указанного типа.

Анализ литературы свидетельствует о том, что изучению структуры течения при микрофакельном горении в системе стабилизаторов пламени уделяется определенное внимание (например, [1, 3–6]). Однако имеющиеся исследования далеко не в полной мере охватывают круг вопросов, актуальных для разработки высокоэффективных микрофакельных горелок. Так, требуют дальнейшего развития исследования, касающиеся эффектов влияния различных конструктивных параметров горелочных устройств на картину течения топлива и окислителя.

**Цель исследований** – установление для стабилизаторных горелочных устройств закономерностей влияния относительного шага между газовыми струями на такие характеристики течения, как глубина  $h$  проникновения струй в поперечный поток окислителя, длина  $L_{от}$  зоны обратных токов в закормовой области стабилизатора, максимальное значение  $U_{max}$  скорости в этой зоне и пр.

**Материалы и методика исследований.** В качестве основного метода исследований использовалось математическое моделирование. Модель процесса включала уравнения Навье-Стокса, неразрывности и сохранения массы компонентов реагирующей смеси. Данная система уравнений замыкалась с использованием  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности в модификации RNG. Задача решалась в трехмерной постановке. Реализация решения осуществлялась с применением пакета прикладных программ ANSYS. Наряду с этим использовались также приближенные аналитические зависимости для нахождения глубины проникновения струй.

**Результаты исследований.** Применительно к рассматриваемым условиям получена зависимость глубины проникновения  $h$  струй газа в поперечный поток окислителя от величины относительного шага между струями. Используя выражение [2]

$$h = k_s d \frac{V_\Gamma}{V_B} \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}}, \quad (1)$$

после ряда преобразований найдено следующее соотношение

$$\frac{h}{H_K} = k_s \frac{4}{\pi L_0} \frac{S}{d \alpha} \sqrt{\frac{\rho_B}{\rho_\Gamma}}, \quad (2)$$

где  $k_s$  – коэффициент, зависящий от величины  $S/d$ ;  $k_s = 1,6 + 0,025(S/d - 4)$ ,  $4 \leq S/d \leq 16$ ;  $d$  – диаметр газоподающих отверстий, м;  $V_B, V_\Gamma$  – средние скорости набегающего воздуха и газа в газоподающих отверстиях, м/с;  $\rho_\Gamma, \rho_B$  – плотности газа и воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – расстояние между газовыми струями, м;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $L_0 = 16,8$ ;  $H_K$  – половина высоты межстабилизаторного канала, м.

Зависимость (2) в отличие от (1) получена применительно к каналу конечных размеров, а не к условиям неограниченного потока. Соответственно этому, как очевидно, выражение (2) может использоваться только при условии  $h/H_K < 1$ . Как показали данные математического моделирования, в широком диапазоне изменения коэффициента загромождения проходного сечения канала  $k_f$  формула (2)

дает удовлетворительные результаты при  $h/H_K \leq 0,8$  ( $k_f = \frac{B_{CT}}{2H_K + B_{CT}}$ , где

$B_{CT}$  – ширина стабилизатора, м).

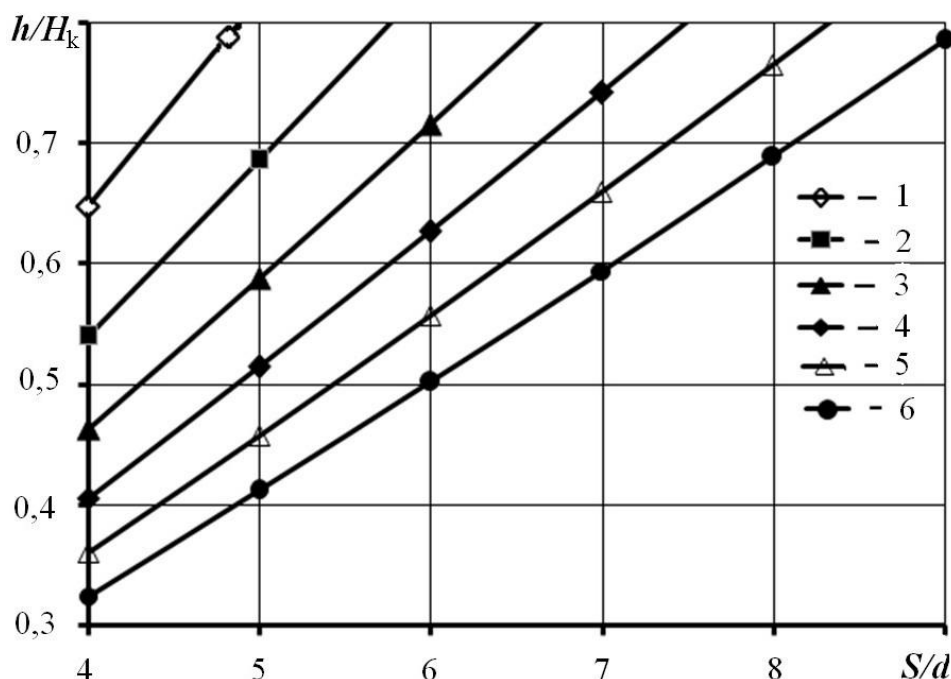
При фиксированных значениях  $\alpha$ ,  $\rho_B$  и  $\rho_\Gamma$  зависимость (2) можно представить в виде

$$\frac{h}{H_K} = A k_S \frac{S}{d}, \quad (3)$$

где  $A = \frac{4}{\pi L_0 \alpha} \sqrt{\frac{\rho_B}{\rho_T}}$ .

Таким образом, в условиях заданного вида топлива, окислителя и величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  относительная глубина проникновения  $h/H_K$  является функцией только шага между газовыми струями  $S/d$ . И поскольку изменение величины  $k_S=f(S/d)$  в рассматриваемом диапазоне параметров сравнительно невелико, то, как видно из рис. 1, функция  $h/H_K=f(S/d)$  весьма близка к линейной для различных фиксированных значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

Представленный характер зависимости  $h/H_K=f(S/d)$ , очевидно, связан с тем, что с увеличением  $S/d$  при неизменной величине общего расхода газа и прочих равных условиях возрастает расход газа, приходящийся на одно газоподающее отверстие, и соответственно повышается средняя скорость подачи газа  $V_T$ . Это обстоятельство и определяет возрастание глубины проникновения струи при увеличении относительного шага  $S/d$ .



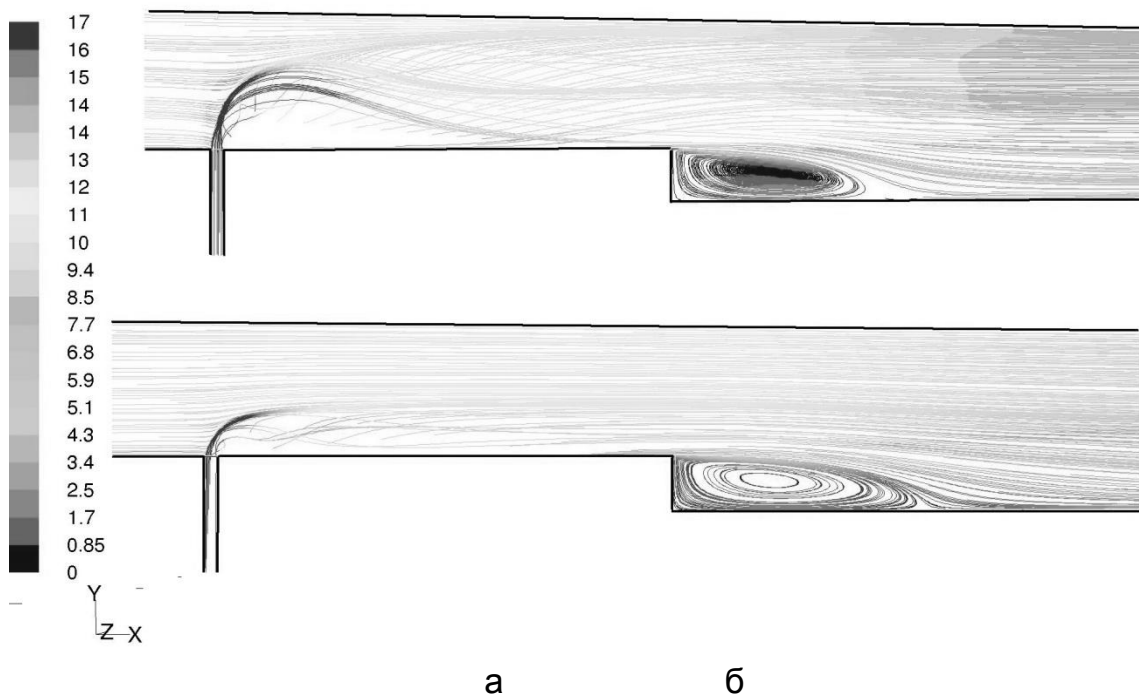
**Рис. 1. Зависимость относительной глубины проникновения струй  $h/H_K$  от шага между ними  $S/d$  при различных значениях коэффициента избытка воздуха:**  
 1 –  $\alpha = 1,0$ ; 2 – 1,2; 3 – 1,4; 4 – 1,6; 5 – 1,8; 6 – 2,0

Ниже на рис. 2 и в таблице приводятся результаты исследований, полученные на основе компьютерного моделирования. Для определения фигурирующих в исходных данных значений скорости газа  $V_T$  предложено следующее выражение

$$V_{\Gamma} = \frac{2U_{BX}^B B_{CT} S \rho_B}{\pi L_0 k_f d^2 \alpha \rho_{\Gamma}}, \quad (4)$$

где  $U_{BX}^B$  – скорость воздуха во входном сечении канала, в котором расположена стабилизаторная решетка, м/с.

На рис. 2 в качестве примера представлены картины линий тока в продольном сечении, проходящем через центр газоподающего отверстия, для величин  $S/d = 6,4$  ( $V_{\Gamma} = 74,75$  м/с) и  $S/d = 3,56$  ( $V_{\Gamma} = 41,54$  м/с) при прочих фиксированных параметрах:  $d = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $U_{BX}^B = 7,0$  м/с;  $\alpha = 1,35$ . Как видно, с возрастанием  $S/d$  наблюдается более глубокое проникновение струй газа в сносящий поток воздуха.



**Рис. 2. Линии тока в продольном сечении, проходящем через центр газоподающего отверстия, для различных величин  $S/d$ :**  
а –  $S/d = 6,4$ ; б –  $S/d = 3,56$

Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют также о том, что величина относительного шага  $S/d$  заметно влияет и на гидродинамическую ситуацию в зоне обратных токов непосредственно за стабилизатором. Возрастающее с увеличением  $S/d$  инжектирующее действие струи газа (т.е. все большее вовлечение окружающего воздуха в струю) обуславливает дополнительное повышение степени разрежения в зоне обратных токов за стабилизатором. Соответственно этому при увеличении  $S/d$  длины зон обратных токов уменьшаются, а максимальные скорости в них возрастают. В таблице представлены данные численных исследований о величинах  $L_{от}$  и  $U_{max}$  при различных значениях  $S/d$  и разных расстояниях  $L_1$  между затупленной задней кромкой стабилизатора и газоподающими отверстиями.

### Характеристики зон обратных токов для $k_f = 0,3$

$L_1, 10^{-3} \text{ м}$	120		80	
$S/d$	6,4	3,56	6,4	3,56
$L_{от}, 10^{-3} \text{ м}$	60,6	69,0	55,2	64,7
$U_{max}, \text{ м/с}$	2,63	1,94	2,55	2,06

Как видно из таблицы при  $L_1 = 80 \cdot 10^{-3}$  м и  $k_f = 0,3$  отличия в величинах  $L_{от}$  и  $U_{max}$  для рассматриваемых значений  $S/d$  составляют соответственно 17,0 и 19,6 %.

Согласно полученным данным отмеченный эффект уменьшения величины  $L_{от}$  и возрастания скорости  $U_{max}$  с увеличением шага  $S/d$  проявляется в меньшей мере при увеличении степени загромождения  $k_f$  проходного сечения канала.

### Выводы

Для горелочных устройств стабилизаторного типа со струйной подачей топлива в сносящий поток окислителя выявлены основные закономерности влияния на характеристики течения относительного шага  $S/d$  между струями. Показано, что глубина проникновения газовых струй в поток окислителя практически линейно зависит от величины  $S/d$ . Установлено также, что увеличение  $S/d$ , вызывающее возрастание инжектирующего действия газовой струи, приводит к уменьшению протяженности зон обратных токов закормовой области стабилизаторов и повышению максимальных скоростей в этих зонах.

### Список литературы

1. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г.Л. Агафонова; под ред. П.А. Власова. – М.: Физматлит, 2003. – 352с.
2. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства / Ю.В. Иванов – М.: Недра, 1972. – 376 с.
3. Математическое моделирование структуры течения при микрофакельном сжигании топлива / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, С.А. Алешко [и др.] // XVIII междунар. конф. [«Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики»], (Ялта, 10–14 июня 2008 г.). – К., 2008. – С.112–114.
4. Микулин Г. А. Аэродинамические характеристики и массообменные свойства трубчатых интенсификаторов горения и стабилизаторов пламени / Г.А. Микулин, Г.Н. Любчик // Энергетика: экономика, технология, экология. – 2004. – Т. 15, № 2. – С. 54 – 62.
5. Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком / Н.М. Фиалко, Л.С. Бутовский, В.Г. Прокопов [и др.] // Пром. теплотехника. – 2010. – №5. – С. 26–33.
6. 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 результати комп'ютерного моделювання щодо встановлення закономірностей впливу кроку між газовими струменями на характеристики течії в стабілізаторних пальникових пристроях із струменевою подачею палива в зносячий потік окислювача. Особливу увагу приділено розгляду ефектів впливу цього кроку на величину глибини проникнення газових струменів впоперечний потік, протяжність зон зворотних токів за стабілізатором, значення максимальних швидкостей в цих зонах та ін.

**Струмінь у зносячому потоці, мікрофакельні пальникові пристрої, крок між струменями, математичне моделювання.**

*The results of computer simulation to establish the patterns of influence of the step between the gas jets on the flow characteristics in the stabilizer burner devices with jet fuel supply to the entraining oxidant stream are given. Particular attention is paid to the consideration of the effect of this step on the depth of penetration of gas jets in cross-flow, the length of the zones of reverse flow beside the stabilizer, the maximum speed in these areas and so forth.*

**Jet in entraining stream, micro-flame burners, step between the jets, mathematical modeling.**

УДК 536.24

### **СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛКАХ С ЭШЕЛОНИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПЛАМЕНИ**

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

**В.Г. Прокопов, доктор технических наук**

**Ю.В. Шеренковский, С.А. Алешко, Г.В. Иваненко, М.З. Абдулин,  
кандидаты технических наук**

**О.Н. Кутняк, младший научный сотрудник**

**А.А. Озеров, научный сотрудник**

**Институт технической теплофизики НАН Украины**

**Л.С. Бутовский, кандидат технических наук\***

**Национальный технический университет Украины «КПИ»**

Представлены результаты исследований закономерностей течения топлива и окислителя в микрофакельных горелочных устройствах с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени. Приведены данные математического моделирования по выявлению влияния количества стабилизаторов на картину течения в эшелонированных стабилизаторных решетках.

---

© Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Ю.В. Шеренковский,  
С.А. Алешко, Г.В. Иваненко, М.З. Абдулин,  
О.Н. Кутняк, А.А. Озеров, Л.С. Бутовский, 2014