

УДК 536.24:533

Фиалко Н.М.<sup>1,2</sup>, Бутовский Л.С.<sup>2</sup>, Прокопов В.Г.<sup>1</sup>, Шеренковский Ю.В.<sup>1</sup>, Меранова Н.О.<sup>1</sup>, Алёшко С.А.<sup>1</sup>, Полозенко Н.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «КПИ»

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ СТАБИЛИЗАТОРНОГО ТИПА С ПОДАЧЕЙ ГАЗА ВНЕДРЕНИЕМ В СНОСЯЩИЙ ПОТОК ВОЗДУХА

Виконано аналіз можливостей організації різного ступеня змішування палива і окислювача в пальниковому пристрої стабілізаторного типу шляхом зміни відстані між зривною кромкою стабілізатора та газоподаючими отворами.

Выполнен анализ возможностей организации различной степени смешения топлива и окислителя в горелочном устройстве стабилизаторного типа путем изменения расстояния между срывной кромкой стабилизатора и газоподающими отверстиями.

The arrangement capabilities of different fuel and oxidant mixture ratio in furnace device of stabilizer type by distance between stalling edge of the stabilizer and gas-intake inlet variation was analyzed.

$c$  – объемная концентрация метана;  
 $D_K, R_K$  – коэффициент диффузии и скорость образования  $K$ -го компонента;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;  
 $N$  – число компонентов смеси;  
 $P$  – статическое давление;  
 $Sc_K$  – число Шмидта  $K$ -го компонента;  $Sc_K = \frac{\nu}{D_K}$ ;  
 $Sc_T$  – турбулентное число Шмидта.  
 $S_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;

$U_j$  – компоненты вектора скорости в направлении  $x_j$ ;  
 $w_K$  – массовая концентрация  $K$ -го компонента;  
 $x_j$  – декартова координата,  $j = 1, 2, 3$ ;  
 $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  
 $\mu, \mu_T$  – молекулярная и турбулентная динамическая вязкость;  
 $\nu_T$  – турбулентная кинематическая вязкость;  
 $\rho$  – плотность среды;  
 $\rho_K$  – парциальная массовая плотность  $K$ -го компонента,  $\rho_K = \rho \cdot w_K$ ;  
 $\tau_{ij}$  – компоненты тензора напряжений.

### Введение

Процессы распределения топлива в окислителе и их смешение, происходящие в собственно горелочном устройстве, как известно, в большой мере определяют основные характеристики горения в топочном пространстве, такие как длина факела, его форма, полнота сгорания топлива и пр. Именно соответствующая организация смесеобразования в горелке призвана обеспечить требуемые параметры горения в топке котлоагрегата [1].

Данная работа посвящена исследованию особенностей смесеобразования в горелочных устройствах с микрофакельным сжиганием топлива в системе плоских стабилизаторов [2-4].

Горелочные устройства такого типа, основанные на многоструйном принципе смесеобразования, открывают широкие возможности в плане реализации необходимой степени смешения топлива с окислителем в устье горелки. Указанная степень смешения может варьироваться в весьма широком диапазоне – от смеси, весь объем которой находится в концентрационных пределах воспламенения, до смеси, в которой лишь локально обеспечивается концентрация, необходимая для устойчивого горения. По ряду соответствующих характеристик механизм сжигания топлива, как очевидно, будет приближаться в первом случае к кинетическому, во втором – к диффузионному. В последней ситуа-

ции процесс смешения топлива и окислителя доминирующим образом реализуется уже вне горелочного устройства в топочном пространстве, а в первой ситуации – в основном в пределах горелки.

Таким образом, указанная возможность управления процессом смешения топлива и окислителя в горелочном устройстве является средством организации требуемого механизма сжигания топлива в топочном пространстве и соответственно средством воздействия на различные характеристики процесса горения.

**Постановка задачи и методика проведения исследований**

В настоящем исследовании рассматриваются особенности организации различной степени смешения струй газа с воздухом в горелочном устройстве струйно-стабилизаторного типа (рис. 1). При этом особое внимание уделяется анализу возможности регулирования указанной степени смешения за счет изменения расстояния  $L_1$  между срывной кромкой стабилизатора и осью газоподающих отверстий.

Математическая модель исследуемого процесса включает в себя систему дифференциальных уравнений в частных производных, которая в декартовой системе координат может быть представлена в следующем виде:

$$\frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j}, i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

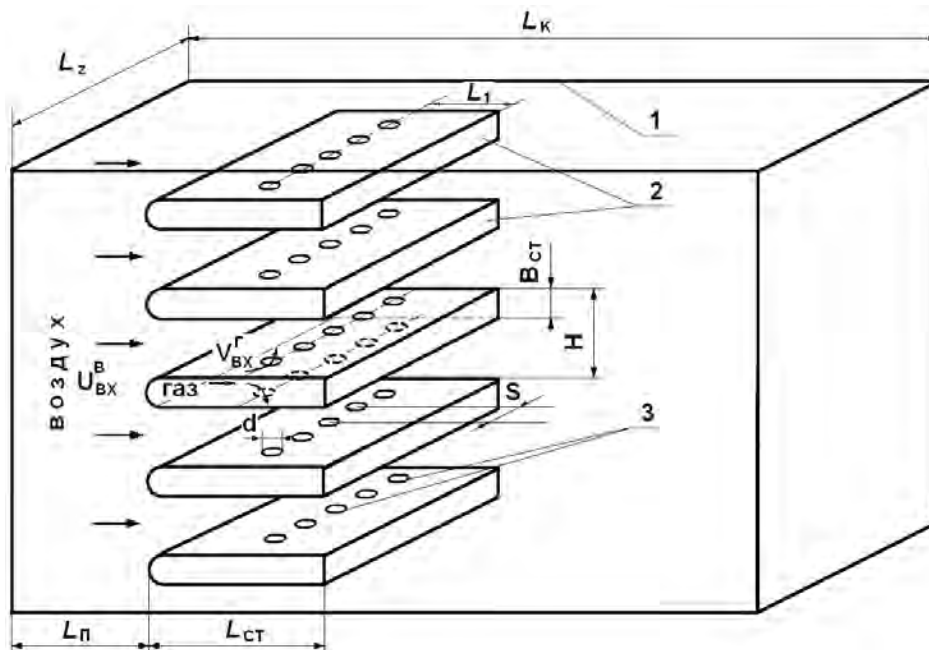
$$\frac{\partial(\rho_k U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v}{Sc_k} + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial \rho_k}{\partial x_j}, K=1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

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

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right).$$

В приведенных уравнениях суммирование производится по повторяющемуся индексу.

Для замыкания системы уравнений (1) – (3) применялась к-ε модель турбулентности в мо-



**Рис. 1. Схема организации микрофакельного сжигания газа в горелочном устройстве струйно-стабилизаторного типа: 1 – плоский канал; 2 – стабилизаторы; 3 – газоподающие отверстия.**

дификации RNG. Обоснование использования этой модели проводилось путем сопоставления результатов расчетов с данными натурных экспериментов.

Численная реализация рассматриваемой задачи осуществлялась с применением программного комплекса Fluent. При этом ввиду регулярности расположения стабилизаторов в стабилизаторной решетке и газоподающих отверстий на стабилизаторах (рис. 1) при математическом моделировании рассматривался лишь характерный элемент изучаемой системы длиной  $L_K$ , равной длине канала, высотой  $H/2$ , составляющей половину шага между стабилизаторами и глубиной  $S/2$ , равной половине шага между газоподающими отверстиями.

На ограничивающих поверхностях выделенного характерного элемента принимались следующие граничные условия. Во входном сечении задавалась скорость воздуха  $U_{BX}^B$  и его степень турбулентности  $Tu_{BX}^B$ . В поперечном сечении газоподающего отверстия на боковой стенке стабилизатора заданными являлись скорость газа  $V_{BX}^G$  и степень турбулентности  $Tu_{BX}^G$ . На остальной поверхности стенок стабилизатора принимались условия прилипания и непроницаемости. На боковых поверхностях выделенного элемента задавались условия симметрии, а в его выходном сечении – «мягкие» граничные условия, отвечающие равенству нулю производных по нормали к границе от независимых переменных.

### Результаты исследований и их анализ

Ниже приводятся результаты исследований по анализу возможности регулирования степени смешения газа с воздухом в горелочном устройстве рассматриваемого типа за счет изменения расстояния  $L_1$  между срывной кромкой стабилизатора и осью газоподающих отверстий. На рис. 2 - 4 в качестве примера представлены данные компьютерного моделирования, отвечающие разным значениям величины  $L_1$ :  $L_1 = 0,12$  м,  $0,08$  м,  $0,025$  м. Прочие исходные параметры для всех значений  $L_1$  при расчетах принимались следующими:  $B_{CT} = 0,03$  м;

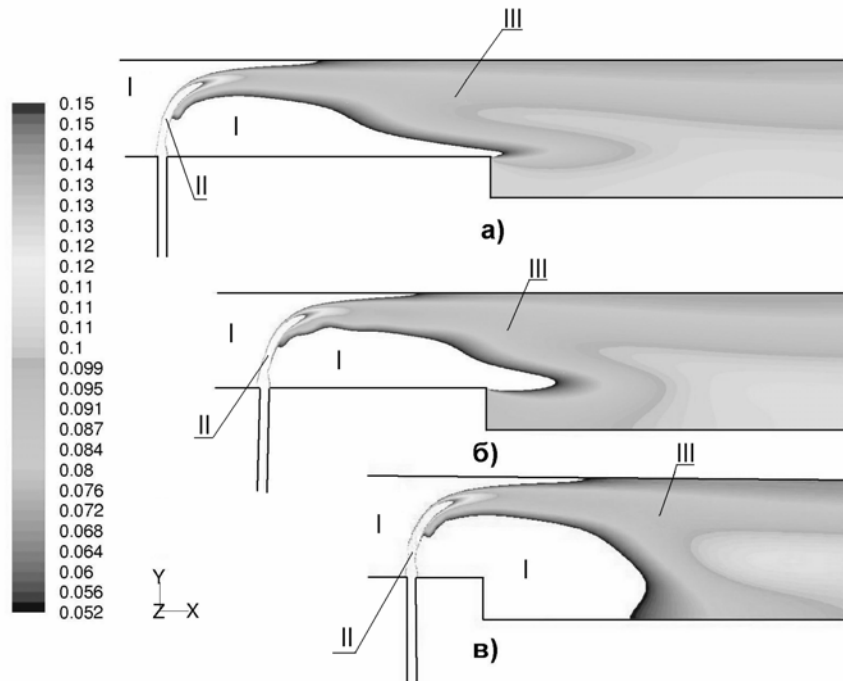
$L_{CT} = 0,22$  м;  $L_K = 0,57$  м;  $L_{II} = 0,05$  м;  $k_f = 0,3$ ;  $d = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $S/d = 6,4$ ;  $U_{BX}^B = 7,0$  м/с;  $V_{BX}^G = 100,9$  м/с, теплофизические свойства газа и воздуха определялись при температуре  $27$  °С.

Указанные на рис. 2 - 4 и далее зоны I, II отвечают подобластям, характеризующимся повышенным содержанием воздуха или топлива соответственно. Здесь в первой зоне объемная концентрация метана меньше нижнего концентрационного предела воспламенения  $c < 0,0523$ , а во второй – превышает верхний концентрационный предел  $c > 0,15$ . В зоне III величина  $c$  находится в концентрационных пределах воспламенения ( $0,0523 \leq c \leq 0,15$ ).

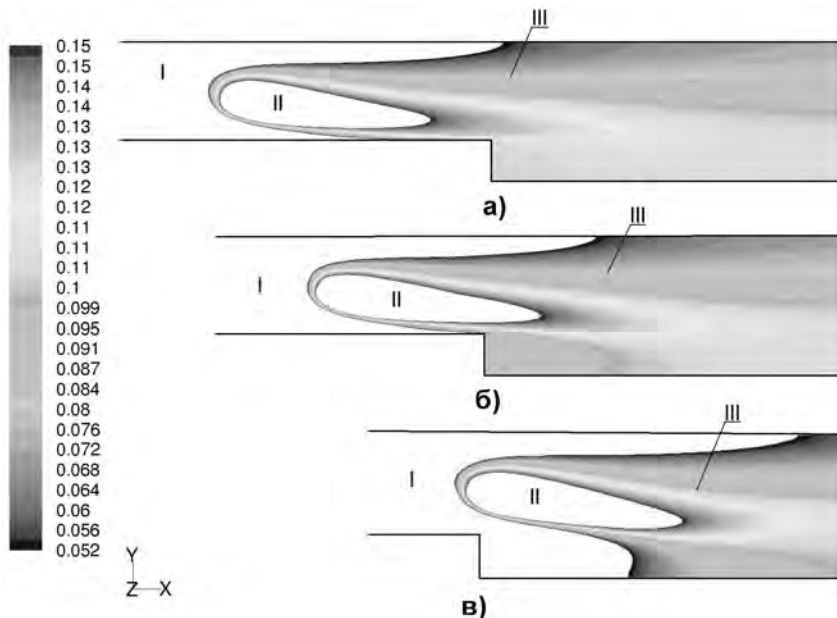
Как видно из рис. 2, а; 3, а; 4, а при  $L_1 = 0,12$  м реализуется весьма высокая степень смешения газовой струи с воздухом, так что в поперечном сечении, проходящем через затупленную заднюю кромку стабилизатора, практически вся смесь находится в концентрационных пределах воспламенения. И соответственно в этих условиях возможно осуществление механизма сжигания топлива, близкого к кинетическому. Картина смешения топлива и окислителя существенно меняется при  $L_1 = 0,08$  м. В данном случае лишь часть указанного сечения занята смесью, отвечающей концентрационным пределам воспламенения. При этом важно подчеркнуть, что в зоне циркуляционного течения в ближнем следе стабилизатора, тем не менее, обеспечиваются требуемые концентрационные пределы горючей смеси и, тем самым, создаются условия, необходимые для стабилизации пламени.

Что же касается особенности смесеобразования при  $L_1 = 0,025$  м, то согласно полученным данным здесь в зоне циркуляции не обеспечивается требуемая для устойчивого горения степень смешения газа с воздухом.

Таким образом, при  $L_1 = 0,08$  м значительная доля процесса смешения будет перенесена в топочное пространство и механизм сжигания топлива будет приобретать также и характеристики диффузионного горения. В случае же  $L_1 = 0,025$  м, как очевидно, процесс горения вообще не может быть реализован ввиду отсутствия необходимых условий для стабили-



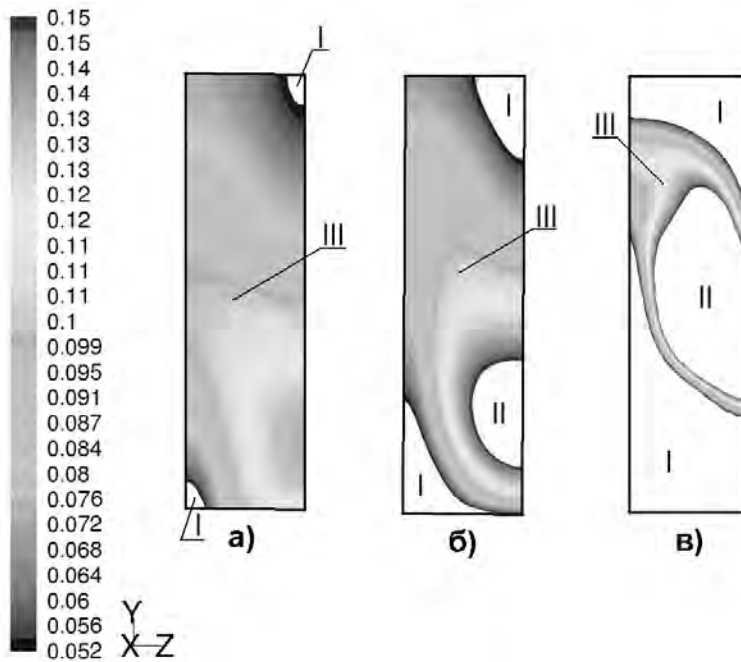
**Рис. 2.** Поля объемной концентрации метана в продольном сечении канала, проходящем через центр газоподающего отверстия, для различных значений расстояния  $L_1$ : а)  $L_1 = 0,12$  м; б)  $L_1 = 0,08$  м; в)  $L_1 = 0,025$  м.



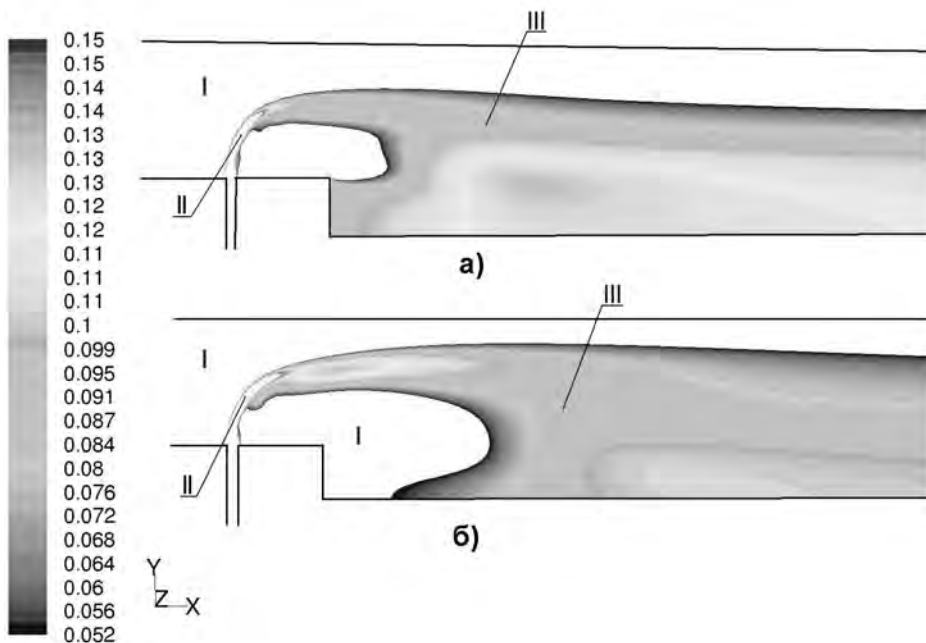
**Рис. 3.** Поля объемной концентрации метана в продольном сечении канала, проходящем посередине между газоподающими отверстиями, для различных значений расстояния  $L_1$ : а)  $L_1 = 0,12$  м; б)  $L_1 = 0,08$  м; в)  $L_1 = 0,025$  м.

зации пламени. Однако, как свидетельствуют результаты проведенных исследований, представленные на рис. 5, и при малых значениях

$L_1$  ( $L_1 = 0,025$  м) все же оказывается возможным обеспечение требуемой степени смешения топлива и окислителя в зоне циркуляции



**Рис. 4.** Поля объемной концентрации метана в поперечном сечении, проходящем через затупленную заднюю кромку стабилизатора, для различных значений расстояния  $L_1$ : а)  $L_1 = 0,12$  м; б)  $L_1 = 0,08$  м; в)  $L_1 = 0,025$  м.



**Рис. 5.** Поля объемной концентрации метана в продольном сечении канала, проходящем через центр газоподающего отверстия, для различных значений диаметра газоподающих отверстий  $d$ : а)  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  м; б)  $d = 3 \cdot 10^{-3}$  м.

за стабилизатором. Это может быть достигнуто благодаря уменьшению только диаметра газо-

подающих отверстий и относительного шага их расположения при прочих неизменных услови-

ях. Так, если при  $S/d = 6,0$  и  $d = 3 \cdot 10^{-3}$  м в зоне циркуляции имеет место избыток воздуха и необходимые концентрационные пределы смеси не обеспечиваются, то уже при  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  м и той же величине относительного шага  $S/d$  ситуация меняется, и в центральной части зоны циркуляции реализуется необходимая степень смешения газа с воздухом. Очевидно, в этом случае основная часть процесса смесеобразования выносится в топочное пространство и соответственно механизм горения оказывается близким к диффузионному.

Выполненные исследования показали также, что для величины диаметра газоподающих отверстий, равного  $2 \cdot 10^{-3}$  м, благоприятная картина смесеобразования в зоне циркуляционного течения за стабилизатором сохраняется и при дальнейшем уменьшении относительного шага  $S/d$ .

### **Выводы**

Приведены результаты исследований закономерностей смесеобразования топлива и окислителя в горелочных устройствах стабилизаторного типа. На основе компьютерного моделирования выполнен анализ возможностей регулирования степени смешения газа с воздухом в устье горелки путем варьирования расстояния  $L_1$  между затупленной задней кромкой стабилизатора и осью газоподающих отверстий.

Установлено, что на выходе из межстабилизаторного канала при достаточно больших значениях  $L_1$  практически вся смесь находится в

концентрационных пределах воспламенения. С уменьшением  $L_1$  степень смешения газа с воздухом снижается, хотя при этом и обеспечивается требуемое для устойчивого горения состояние смеси в закормовой области стабилизатора.

Показано, что при сравнительно малых величинах  $L_1$  необходимая степень смешения топлива и окислителя в зоне циркуляции за стабилизатором может быть достигнута при уменьшении диаметра газоподающих отверстий и шагов их расположения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. – М.: Недра, 1972. – 376 с.
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. Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алёшко С.А., Полозенко Н.П. Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени // Пром. теплотехника. – 2010, №6. – С.28-36.
4. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Фиалко Н.М. Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток // Технологические системы. – 2010. – Т.52, №3. – С.72–78.

*Получено 09.11.2010 г.*