

**Отримані результати експериментальних досліджень робочого процесу струменево-нишевих систем (СНС) при роздачі палива в потік окисника однорядною системою перпендикулярних круглих струменів в ізотермічних умовах. Проведені числові розрахунки масообмінних характеристик струменево-нишевих систем з роздачею палива через один та більше рядів отворів**

**Ключові слова: струменево-нишева система, паливоподача, струмені, комп'ютерне моделювання**

**Получены результаты экспериментальных исследований рабочего процесса струйно-нишевых систем (СНС) при раздаче топлива в поток окислителя однорядной системой перпендикулярных круглых струй в изотермических условиях. Проведены расчеты массообменных характеристик струйно-нишевых систем с раздачей топлива одним и более рядами топливных отверстий**

**Ключевые слова: струйно-нишевая система, топливораздача, струи, компьютерное моделирование**

УДК 536.24:533

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТОПЛИВОРАЗДАЧИ В СТРУЙНО-НИШЕВЫХ СИСТЕМАХ

**М. З. Абдулин**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: mزابdulin@gmail.com

**А. А. Серый**

Аспирант\*

E-mail: Seruy\_Alex@i.ua

\*Кафедра теплоэнергетических установок тепловых и атомных электрических станций Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

## 1. Введение

Организация надежной работы топливосжигающего оборудования во многом зависит от устойчивости рабочего процесса горелочных устройств [1 – 3]. Обеспечение зажигания, стабилизации и выгорания топлива определяет в целом эколого-экономические показатели огнетехнических объектов. В горелочных устройствах струйно-нишевого типа стабилизация пламени происходит в зоне обратных токов (ЗОТ), возникающей в результате аэродинамического взаимодействия струй топлива и окислителя в ближнем следе за рядами газоподающих отверстий и в нишевой полости. В данном случае важное значение имеет оценка массообменных характеристик активного потока и зон циркуляции, отвечающих за надежное поджигание топливной смеси.

## 2. Анализ исследований и публикаций

Анализируя основные типы оборудования, использующие газообразное топливо, можно сделать вывод о том, что стабилизация процесса сжигания может быть выполнена следующим образом:

- термическая стабилизация (поджигание свежей смеси происходит при прохождении ее через раскаленную амбразуру котла);
- аэродинамическая стабилизация (образование зоны обратных токов продуктов сгорания в области подачи топлива и окислителя) которая может быть организована при использовании

закрутки потока или плохообтекаемых тел, таких как: уголок или пилон [4, 5].

## 3. Формирование целей и задач

Актуальность работы определяется необходимостью расширения пределов мощности и коэффициента регулирования горелочных устройств данного типа при сохранении основных преимуществ технологии [6].

В приведенной работе рассмотрены гидродинамические процессы, происходящие в струйно-нишевой системе при раздаче топлива круглыми струями перпендикулярно в поток окислителя через один и более рядов отверстий (рис. 1). Основные характеристики исследуемой системы следующие:  $L$ ,  $H$  – длина и глубина ниши,  $d$  – диаметр газоподающих отверстий,  $S$  – шаг расположения отверстий,  $h$  – дальность струй,  $\bar{S} = S/d$  – относительный шаг расположения газоподающих отверстий принимался равным для всех рядов 3,2,  $U_v$  – скорость набегающего потока воздуха 10 м/с,  $U_g$  – скорость истечения газа 50 м/с. Результаты основных характеристик получены при помощи компьютерного моделирования. Используемая математическая модель процесса была верифицирована на экспериментальных данных, полученных для однорядной системы струй (рис. 2).

Выбор диаметров производился из предпосылки о равенстве расходов топлива сопоставляемых вариантов газоподачи. Диаметры отверстий принимались из условия  $d_2 \leq 0,5 \cdot d_1$  для обеспечения необходимой величины дальности струй и рационального

распределения топлива в потоке окислителя. Значение величины дальнобойности можно определить по следующему соотношению:

$$h_c = k_c \cdot \sin \beta \cdot d \cdot \sqrt{q}, \quad (1)$$

где  $k_c$  - коэффициент, учитывающий шаг расположения отверстий,  $\beta$  - угол ввода струй топлива в воздушный поток,  $d$  - диаметр газоподающих отверстий, гидродинамический параметр:

$$q = \frac{\rho_r \cdot W_r^2}{\rho_b \cdot W_b^2}. \quad (2)$$

Расстояние между рядами отверстий для всех рассмотренных вариантов выбиралось из условия развития струй вне области гидродинамической тени и было равным 15 мм. В работе рассмотрены варианты: однорядная с диаметрами 4,75 мм, двухрядная -  $d_1 = 4,3$ ,  $d_2 = 1,4$  мм, трехрядная -  $d_1 = 3,8$ ,  $d_2 = 1,9$ ,  $d_3 = 1$ , мм.

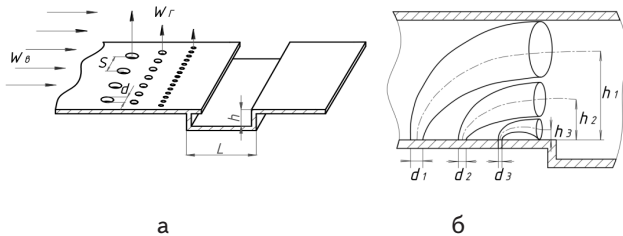


Рис. 1. Струйно-нишевая система с тремя рядами газоподающих отверстий: а - общий вид, б - основные геометрические характеристики струйной подачи топлива в СНС

Основным методом исследований является компьютерное моделирование, позволяющее обеспечить значительное сокращение ресурсов (материальных и временных) по сравнению с проведением натурального эксперимента. Математическое описание процессов производилось с помощью ниже представленных дифференциальных уравнений в частных производных 3 - неразрывности, 4 - движения, 5 - переноса  $i$ -го компонента смеси. Замыкание системы производилось с помощью двухпараметрической модели турбулентности  $k-\epsilon$ . [7, 8].

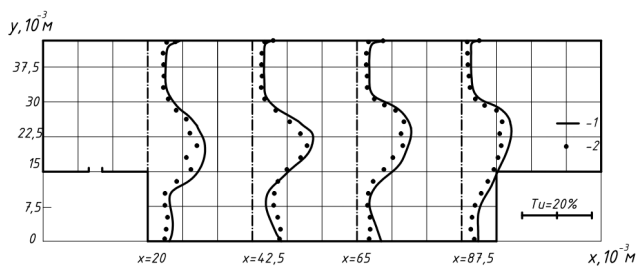


Рис. 2. Результаты расчетов величины интенсивности турбулентности в СНС для однорядной газораздачи в различных сечениях по длине канала ( $y, x$ -высота и длина канала соответственно) при:  $U_b = 50$  м/с;  $S = 3$ ;  $d = 2$  мм;  $L/H = 75/15$ ; ;  $U_r = 110$  м/с 1 - эксперимент, 2 - расчет [9, 10]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0, j = 1, 2, 3; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j}, \quad (4)$$

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

$K = 1, 2, 3 \dots K - 1,$

$$\tau_{ij} = \rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right), \quad (6)$$

где  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $U$  - скорость, м/с;  $P$  - статическое давление, Па;  $x$  - пространственная координата, м;  $Sc$  - турбулентное число Шмидта;  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $K$  - количество компонентов смеси.

#### 4. Анализ результатов численных экспериментов

Сопоставление результатов расчета и эксперимента позволяет сделать вывод о некотором занижении расчетной величины интенсивности турбулентности во всей области. Величина отклонения при этом не превышает 20 % (рис. 3).

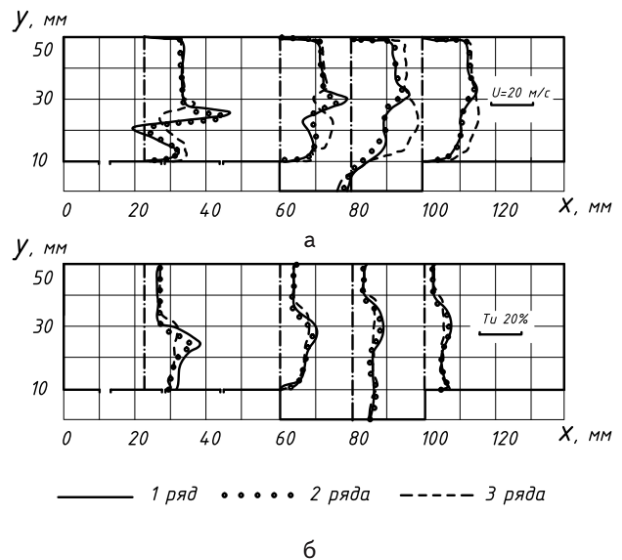


Рис. 3. Результаты расчетов в различных сечениях по длине канала: а - величина осевой компоненты скорости  $U$ ; б - интенсивность турбулентности  $Tu$  %

Анализируя полученные результаты по профилям скоростей в плоскости, проходящей через середину струи, выделяется четкий максимум для однорядной подачи соответствующий траектории развития газовых струй, а также наличия в сечении  $x=20$  мм зарождения зоны циркуляции в области под рядом газовых струй. Следует заметить, что для многорядной системы в указанном сечении циркуляционное тече-

ние отсутствует. Данное обстоятельство объясняется воздействием струй топлива 2-го и 3-го рядов (для 3-х рядной подачи) повышающих давление в ближнем следе за системой струй и нарушающих процесс зарождения зоны циркуляции.

В области нишевой полости для трех схем наблюдается наличие вихревого циркуляционного течения с той разницей, что уровни максимальных скоростей имеют большие значения соответственно для многорядной газораздачи. В целом необходимо отметить, что профиль скорости для трехрядной схемы характеризуется большей равномерностью в сравнении с однорядной, очевидно из-за влияния вводимых струй газа. Профили интенсивности турбулентности схожи для всех схем с некоторым превышением ее величины для однорядной подачи в сечениях, расположенных до передней стенки ниши (рис. 4).

Ниже приведены результаты численных экспериментов, в частности значение  $U^* = U/U_B$ .

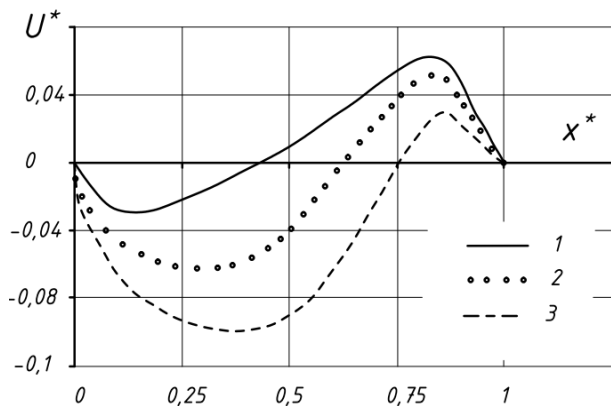


Рис. 4. Изменение скорости  $U^*$  в нише в сечении проходящем через центр ЗОТ для одно-, двух- и трехрядной подачи топлива

Основным моментом здесь следует отметить на порядок больший уровень скоростей потока в зоне обратных токов для многорядной подачи топлива, а также смещение центра вихревого течения в сторону задней стенки ниши. Кроме того, размеры ЗОТ несколько больше для многорядной газораздачи. Эти явления возникают в результате усиления эжектирующего воздействия многорядной системы струй газа, а также влиянием ограниченного пространства ниши (рис. 5).

На рис. 6 приведены массообменные характеристики вихревого течения в нише и основного потока топлива и окислителя. Как уже говорилось, важным моментом оценки стабилизирующей возможности СНС при различных вариантах газораздачи служит относительный расход потока смеси в нише, который может быть определен как  $G_i^* = G_i / G_k$ , где  $G_k$ -общий расход компонентов, участвующих в рабочем процессе горелочного устройства.

$$G_i = \rho \int_{-y|U=0}^{+y|U=0} U_i dy, (i=1,2,...). \tag{7}$$

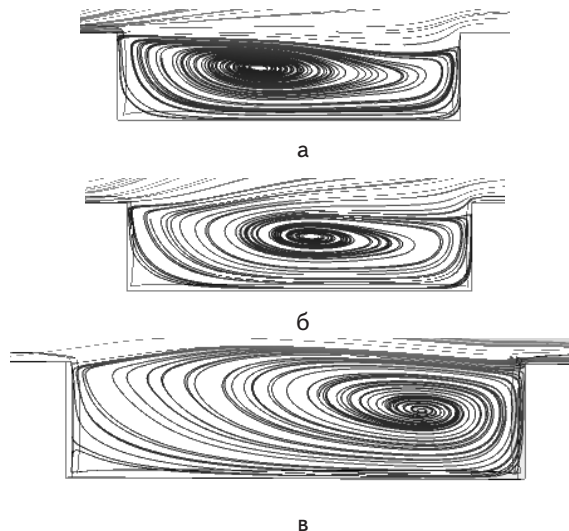


Рис. 5. Линии токов в нише для: а – однорядной подачи, б – двухрядной подачи, в – трехрядной подачи

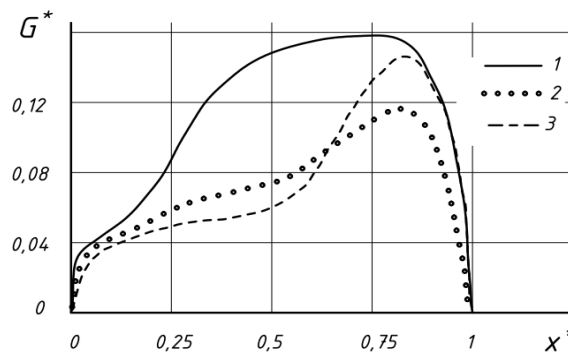


Рис. 6. Распределение расхода  $G^*$  по длине ниши  $x^*$  для 1 – однорядной, 2 – двухрядной, 3 – трехрядной газоподачи в СНТ

Для геометрии СНС, рассмотренной в данной работе, количество потока захватываемое в нишу, достигает 15 % от общего расхода смеси для однорядной схемы. Многорядность в данном случае определяет смещение максимума расходных характеристик в сторону задней стенки ниши, что коррелируется с приведенными ранее данными.

Представляет интерес оценка гидравлического сопротивления, оказываемого потоку струями топлива. Как видно, многорядная газораздача, создавая газодинамический экран, определяет несколько большие значения гидравлических потерь по тракту окислителя в сравнении с многорядной системой. Данные расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение перепада полного давления в СНС для различных вариантов газораздачи

Схема, рядов отверстий	1	2	3
Перепад давления, $\Delta P$ , Па	20	25,4	30

#### 4. Выводы

1 Проведено исследование процессов гидродинамики в СНС для однорядной топливораздачи.

2. Выполнена верификация математической модели турбулентности с использованием данных, полученных в лабораторных условиях.

3. Выполнен комплекс численных расчетов гидродинамических и массообменных характеристик в СНС при использовании одного и больше рядов топливopодющих отверстий. Установлено, что:

- уровни скоростей в ЗОТ для многорядной подачи на порядок больше в сравнении с однорядной схемой;

- многорядность вызывает смещение центра вихревой структуры в нише в направлении задней стенки;

- относительный расход компонентов активного потока в ЗОТ достигает максимальных значений по всей поверхности захвата потока в нишу именно для однорядной газораздачи.

4. По результатам численного эксперимента можно сделать вывод об увеличении перепада давления по воздуху с увеличением количества рядов газоподдающих отверстий.

5. Полученные результаты позволяют сделать вывод о преимуществе однорядной схемы газораздачи с точки зрения стабилизационных качеств в сравнении с многорядной схемой.

#### Литература

1. Иванов, Ю. В. Основы расчета и проектирования газовых горелок [Текст] / Ю.В. Иванов. — Ленинград.: 1975. — 360 с.
2. Винтовкин, А. А. Современные горелочные устройства [Текст] / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, — М.: Машиностроение, 2001. — 487 с.
3. Пчелкин, Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.М. Пчелкин. — М.: Машиностроение, 1984. — 282 с.
4. Бутовский, Л. С. Исследование закономерности выгорания пламени за уголковыми плоскими стабилизаторами пламени [Текст] / Л.С. Бутовский, Е.А. Грановская, Г.Н. Любчик, В.А. Христинич // Теория и практика сжигания газа, 1975. — вып. 6. — С. 324–338
5. Шестаков, Н. С. Модернизация горелочных устройств энергетических котлов на газообразных и жидких топливах [Текст] / Н.С. Шестаков, А.Э. Лейкам, В.А. Асосков, А.П. Сорокин // Теплоэнергетика, 2012. — №3. — С. 31–37
6. Абдулин, М. З. Технология сжигания – определяющий фактор эффективности огнетехнических объектов / М.З. Абдулин., Г.Р. Дворцин, А.М. Жученко // Научно-технический журнал «Новости теплоснабжения», 2008. — №4. — С. 31–34
7. Молочников, В. М. Исследование применимости пакета FLUENT к моделированию дозвуковых отрывных течений [Текст] / В.М. Молочников, Н.И. Михеев, О.А. Душина // Теплофизика и аэромеханика, 2009. — Т. 16, № 3. — С. 387–394.
8. Gourara, A. Numerical and experimental investigation of the influence of the wake behind an injector frame on jet dilution in a crossflow / Gourara A., F. Roger, J.-M. Most, H. Y. Wang // Flow, Turbulence and Combustion, 2005. — p. 355–385.
9. Ибрагим Джамал Особенности рабочего процесса модуля горелочного устройства с поперечной подачей струй газа / авто-реф. дис. канд. техн. наук: 05.04.01 // Джамал Абдель Карим Ибрагим; КПИ. — К., 1997. — 118 с.
10. 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.