

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, β - 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.

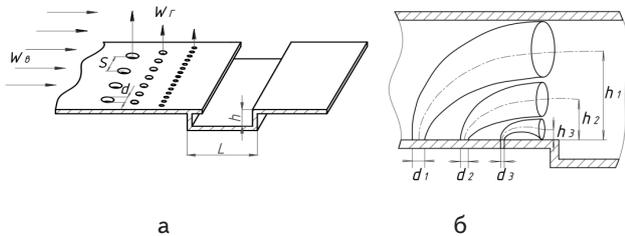


Рис. 1. Струйно-нишевая система с тремя рядами газоподающих отверстий: а - общий вид, б - основные геометрические характеристики струйной подачи топлива в СНС

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].

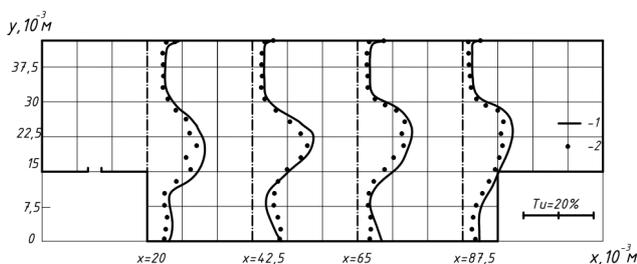


Рис. 2. Результаты расчетов величины интенсивности турбулентности в СНС для однорядной газораздачи в различных сечениях по длине канала (y, x -высота и длина канала соответственно) при: $U_b = 50$ м/с; $S = 3$; $d = 2$ мм; $L/H = 75/15$; ; $U_r = 110$ м/с 1 - эксперимент, 2 - расчет [9, 10]

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

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

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

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

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

где ρ - плотность, кг/м³; U - скорость, м/с; P - статическое давление, Па; x - пространственная координата, м; Sc - турбулентное число Шмидта; v - коэффициент кинематической вязкости, м²/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).

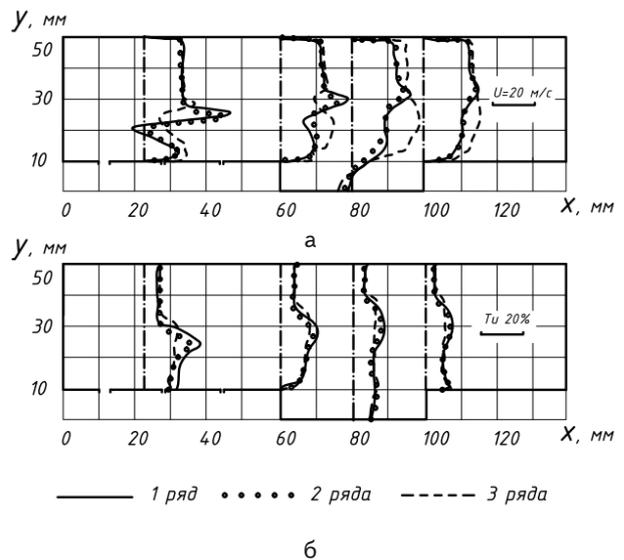


Рис. 3. Результаты расчетов в различных сечениях по длине канала: а - величина осевой компоненты скорости U ; б - интенсивность турбулентности Tu %

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 $U^* = U/U_B$.

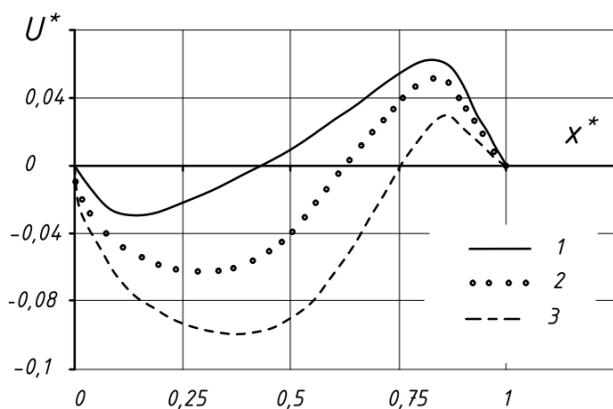


Рис. 4. Изменение скорости U^* в нише в сечении проходящем через центр ЗОТ для одно-, двух- и трехрядной подачи топлива

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.

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

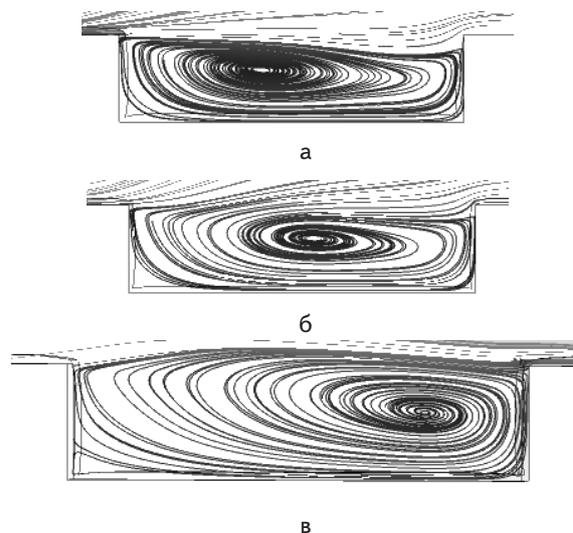


Рис. 5. Линии токов в нише для: а — однорядной подачи, б — двухрядной подачи, в — трехрядной подачи

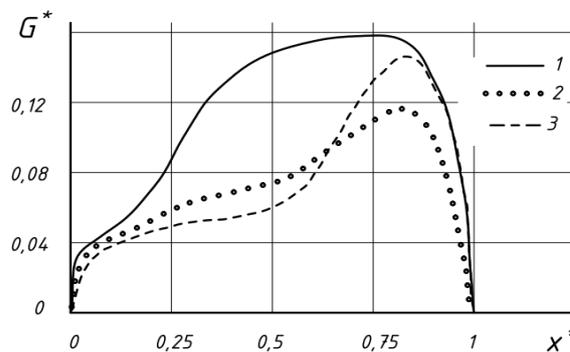


Рис. 6. Распределение расхода G^* по длине ниши x^* для 1 — однорядной, 2 — двухрядной, 3 — трехрядной газоподачи в СНТ

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, ΔP , 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 газороздачи 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 / автореф. 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.