

УДК 621.311.22

М. З. АБДУЛИН¹, А. А. СЕРЫЙ¹, А. М. ЖУЧЕНКО²¹ *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*² *НПО «Струйно-нишевая технология», Киев*

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАМЕР СГОРАНИЯ

В статье рассмотрены сложные взаимосвязи рабочего процесса горелочных устройств (ГУ) на основе струйно-нишевой системы (СНС) сжигания газообразного топлива. Приведены основные геометрические и режимные параметры системы, позволяющие эффективно использовать топливо в камерах сгорания (КС) огнетехнического оборудования. Основные результаты получены экспериментальным путем. Данные по процессам смешения, времени пребывания объема смеси, поля температур и скоростей получены расчетным методом с применением методов вычислительной газовой динамики. Выявлено влияние основных конструктивных факторов на показатели рабочего процесса КС и ГУ.

Ключевые слова: струйно-нишевая технология, горелочные устройства, камеры сгорания, рабочий процесс.

Введение

Рабочий процесс камер сгорания (КС) представляет собой сложную взаимосвязь гидротермохимических процессов, которые в настоящее время с большим трудом поддаются математическому моделированию. Поэтому основным инструментом исследований на сегодняшний день остается лабораторный и промышленный эксперимент [1].

В постперестроечное время значительно сократилось количество экспериментальных работ в сфере практики сжигания топлива. Это заметно сказалось на соответствии эффективности топливоиспользующего оборудования современным требованиям экономичности, экологической безопасности и надежности работы. Как правило, существенное повышение экономичности сопровождается ухудшением остальных показателей. Для комплексного улучшения эффективности топливоиспользования вводится дорогостоящая система автоматики.

На сегодняшний день, существующие подходы к организации рабочего процесса КС практически не развиваются и исчерпали свой потенциал. Конструкции КС с точки зрения формирования аэродинамической структуры течения практически не меняются. На рис. 1 а, б представлены КС трубчатого и кольцевого типа, соответственно, основой рабочего процесса которых является закрутка потока при помощи воздушных регистров. Так как, опыт передовых достижений в совершенствовании рабочего процесса КС используется для различных видов огнетехнического оборудования (ОО), то на рис. 1 в приведены фронтальные устройства ГУ для котлов, печей, сушил и т.д. ведущих мировых производителей газогорелочного оборудования также использующих закрутку потока окислителя.



а



б



в

Рис. 1. Горелочные устройства с закруткой потока окислителя: а - трубчатой КС; б - кольцевой КС; в - ведущих фирм производителей газогорелочного оборудования «Wayshaupt», «Riello», «Girsh» и др.

циент, учитывающей особенности структуры течения за системой струй [6].

2.2. Создание структуры течения горючего, окислителя и продуктов сгорания

Гидродинамика потока Г, О и ПС в системе является основополагающим элементом рабочего процесса ГУ. Течение характеризуется образованием устойчивых вихревых структур в СНС, которые, в свою очередь, обеспечивают стабилизацию процесса горения в широком диапазоне скоростей топлива и окислителя. На общую картину течения влияют в большей или меньшей мере все параметры СНС (конструктивные и режимные).

Исследования показывают, что СНС обеспечивает автомодельность процесса смесеобразования в широком диапазоне нагрузок, а соответственно и гидродинамического параметра \bar{q} . Номинальный режим горелочных устройств СНТ соответствует $\bar{q} = 10 \div 12$. При $\bar{q} < 2$, проявляется эффект Коанда, то есть при выходе из отверстий струя «прилипает» к стенке ($\bar{q}_{кр}^{-I}$). Максимальное же значение \bar{q} зависит от величины затенения проходного сечения канала и может достигать значений $40 (\bar{q}_{кр}^{-II})$ [7].

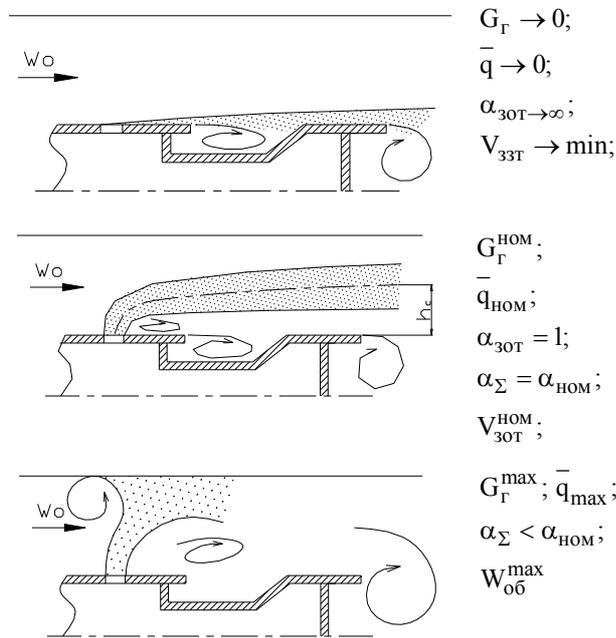


Рис. 4. Физическая модель течения и смесеобразования в струйно-нишевом модуле [8], где:

G_Γ - расход топлива, α_{3OT} - коэффициент избытка воздуха в зоне обратных токов ЗОТ,

$W_{об}^{max}$ - скорость окислителя, который обтекает струи топлива

2.3. Смесеобразование

Математическая модель процессов происходящих в горелочных устройствах в работе представлена на следующем образом:

$$\left. \begin{aligned} \nabla(\bar{\rho}\tilde{V}) &= 0; \\ (\bar{\rho}\tilde{V} \cdot \nabla)\tilde{V} &= -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_{eff} + \bar{\rho}g; \\ \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{V}\tilde{h}) &= \nabla \cdot \left(\frac{\lambda \nabla T}{Sc_t} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla h \right) + \\ &+ \bar{\tau}_{eff} : \nabla V + E(\tilde{T}); \\ \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{V}k) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \\ &+ P_k - \bar{\rho}\epsilon; \\ \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{V}\epsilon) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \\ &+ C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k}; \end{aligned} \right\} (3)$$

где $\bar{\rho}$ - плотность, осредненная по Рейнольдсу, кг/м³;

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ - оператор Гамильтона;

$\tilde{V}^T = (\tilde{V}_x, \tilde{V}_y, \tilde{V}_z)$ - вектор скорости осреднен-

ный по Фавру ($\tilde{f} = \overline{rf/\bar{\rho}}$), м/с; p - давление,

Па; $\bar{\tau}_{eff}$ - тензор эффективных напряжений растяжения-сжатия, Па;

μ - динамическая вязкость, Па·с;

$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ - турбулентная вязкость, Па·с;

k - турбулентная кинетическая энергия, Дж/кг;

ϵ - скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, Дж/(кг·с);

I - единичный тензор второго ранга;

$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$ - число Шмидта;

\tilde{h} - массовая энтальпия, Дж/кг;

c_p - массовая теплоемкость, Дж/(кг·К);

T - температура, К;

T_{ref} - температура отсчета, К;

λ - теплопроводность, Вт/(м·К);

$\nabla \cdot$ - оператор скалярного произведения вектора на градиент;

$E(\tilde{T})$ - объемная плотность радиационного теплового потока «серой» излучающей и поглощающей среды, Вт/м³;

P_k - объемный источник за счет турбулентной вязкости потока, Вт/м³;

$C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_{\varepsilon_1} = 1,44$; $C_{\varepsilon_2} = 1,92$ - константы стандартной $k-\varepsilon$ модели.

Граничные условия задавались следующим образом: во входных сечениях принимались постоянные значения соответствующих величин (температуры, скорости, k и ε); на выходе - мягкие граничные условия; на твердых границах - условия прилипания.

Взаимосвязь концентрации топлива по объему топочного пространства с параметрами системы характеризуется зависимостью $C_{\%} = f(L_1, d, \bar{S}, \bar{q})$.

Как известно, в СН системе преобладает микродиффузионный механизм горения, обладающий рядом преимуществ [9]. При этом процессы смесеобразования в основном определяются относительным шагом расположения отверстий, гидродинамическим параметром и конструктивными параметрами нишевой полости. На рисунке приведены результаты численных расчетов, которые показывают одну важную особенность системы – равномерность распределения компонентов смеси в зоне стабилизации пламени. На рис. 5 представлены поля коэффициента избытка воздуха в плоскости, проходящей через центр нишевой полости параллельно нижней стенке ниши для одного из режимов работы системы.

Как видно, позиция 5 б является наиболее предпочтительной с точки зрения обеспечения концентрационных пределов воспламенения пламени, позиции а и в характеризуются соответственно обогащенной и обедненной горючей смесью. Следует отметить, что при отклонении геометрических параметров топливоподачи от оптимального, указанная равномерность нарушается (рис. 5 в).

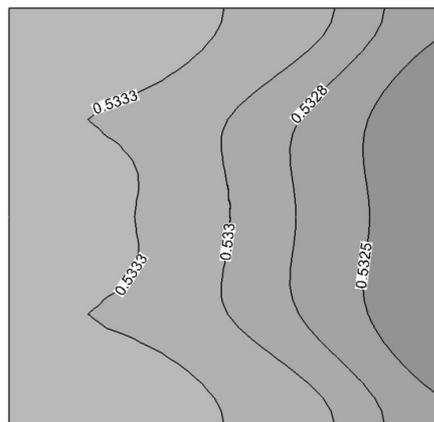
Во всех рассмотренных случаях концентрация топлива выше в области, примыкающей к задней стенке ниши из-за воздействия на струйную подачу топлива нишевой вихревой структуры, увлекающей смесь в зону обратных токов.

2.4. Воспламенение смеси и стабилизация процесса горения

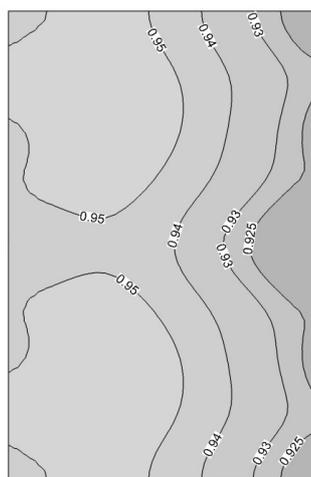
Стабилизационные качества системы характеризуют диапазон ее устойчивой работы без срыва и проскока пламени, а также определяют:

- диапазон коэффициента регулирования объема в целом;
- безопасность работы ОО (отсутствие загазованности);
- отсутствие термических ударов.

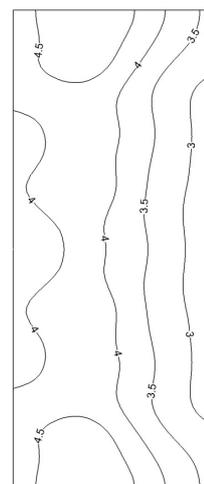
В ГУ СНТ стабильность процесса горения в основном обеспечивается устойчивостью вихревой структуры в области стабилизации за срывной кромкой пилона (рис. 6).



а

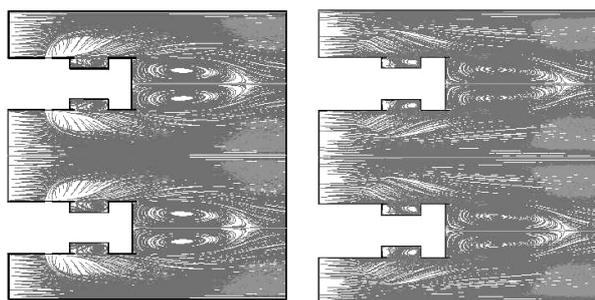


б



в

Рис. 5. Поля коэффициента избытка воздуха в плоскости, проходящей через центр нишевой полости параллельно дну ниши в струйно-нишевой системе с характеристиками ($d=4,5$ мм; $L/H=25/7$; $Wb=10$ м/с; $\bar{q}=15$): а - $\bar{S}=2$; б - $\bar{S}=3,2$; в - $\bar{S}=5$



а

б

Рис. 6. Линии токов в системе плоских пилонов пламени, работающей на основе СНС в плоскости, проходящей: а – через центр газоподающего отверстия, б – между газоподающими отверстиями

На рис. 7 приведена область, характеризующая диапазон устойчивой работы системы. Эксперименты проводились на решетке из двух пилонов шириной 25 мм, коэффициент загромождения канала

$k_f = 0,3$ обеспечивает устойчивое горение в широком диапазоне скоростей топлива и окислителя, причем приструйная ниша значительно расширяет пределы устойчивого горения по суммарному коэффициенту избытка воздуха на систему α_Σ [10].

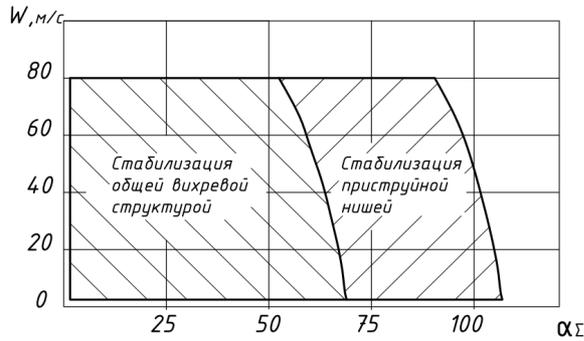


Рис. 7. Пределы устойчивого горения в струйно-нишевой системе $B=25$ мм; $k_f=0,3$; $d=4$ мм; $S=16$ мм, $t_b=25$ °С, (W -скорость воздушного потока, ограничена возможностями стенда)

Одним из критериев оценки стабилизационных качеств системы может служить среднее время пребывания элементарного объема смеси в зоне обратных токов τ_{Pi} .

Ниже приведены данные по стабилизационным характеристикам ЗОТ при струйной подаче и без нее (табл. 1). В целом струи топлива несколько увеличивают время пребывания в ЗОТ независимо от величины загромождения потока пилонами пламени. Особенно этот эффект проявляется при внедрении газовых струй диаметром 7,5 мм и более. В табл. 1 приведены данные численных расчетов.

Таблица 1

Время пребывания элементарного объема смеси в зоне стабилизации пламени в СНС

K_f	0,3			0,6				
	Воздушные продувки	5	7,5	10	Воздушные продувки	5	7,5	10
$\tau_{Pi} \cdot 10^{-2} c$	3,8	6,0	9,34	9,86	1,2	3,3	7,4	6,9

2.5. Выгорание топлива

Эффективность сжигания топлива определяется полнотой его выгорания. Основными конструктивными факторами, определяющим выгорание газа в ГУ СНТ, являются конструктивные параметры газораздающих отверстий и шаг расположения пилонов. Исследования различных модификаций решеток из струйно-нишевых пилонов показали высо-

кую интенсивность выгорания при минимально возможных коэффициентах загромождения потока, что является предпосылкой к малому аэродинамическому сопротивлению таких систем и обеспечивает возможность создания ГУ с малыми затратами энергии на подачу окислителя. Минимальный характерный размер пилонов, из условия равномерного распределения горючего по отверстиям, составляет $B=10$ мм.

В результате лабораторных экспериментов установлено, что полнота выгорания природного газа за пилоном и за решеткой существенно отличается, при этом длина факела за системой пилонов ($\eta_r=95\%$) значительно короче, чем за одиночным пилоном. Кроме того, появляется возможность существенно варьировать шаг между пилонами (t , мм) и таким образом доводить коэффициент загромождения потока (k_f) до предельно низких значений 0,15 и ниже [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

2.6. Формирование полей температур и скоростей ПС

Одной из основных задач ГУ является создание условий для формирования требуемых скоростных и особенно температурных условий в КС огнетехнических объектов в зависимости от их назначения. На рис. 8 приведены изолинии температур и скоростей в топочном пространстве котла работающего с ГУ СНТ – 22.

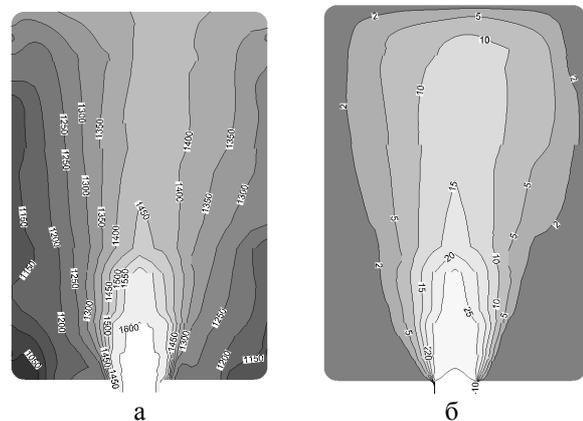


Рис. 8. Изолинии: а - температур, К; б – скоростей, м/с, продуктов сгорания природного газа в горизонтальном сечении, проходящем через амбразуру прямоугольной топочной камеры оборудованной ГУ типа СНТ-22

Заключение

Проведенные исследования позволили выявить рациональные значения основных конструктивных параметров для СНС, определяющие надежность, экономичность и безопасность работы системы, на основе которой работают ГУ мощностью от 0,01 до 40 МВт.

Литература

1. Абдулин, М. З. Технология сжигания топлива – основа создания высокоэффективных камер сгорания [Текст] / М. З. Абдулин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 4/61. – С. 40 - 42.
2. Перспективные разработки повышения эффективности работы КС ГТД на основе струйно-нишевой технологии [Текст] / М. З. Абдулин, Ю. А. Кулешов, Г. Р. Дворцин, А. М. Жученко // *Газотурбинные технологии*. – 2012. – № 9(110). – С. 26 - 31.
3. Абдулин, М. З. Технология сжигания – определяющий фактор эффективности огнетехнических объектов [Текст] / М. З. Абдулин, Г. Р. Дворцин, А. М. Жученко // *Новости теплоснабжения*. – 2008. – № 4. – С. 31 - 34
4. Абдулин, М. З. Струйно-нишевая технология сжигания топлива на объектах муниципальной энергетики [Текст] / М. З. Абдулин, В. С. Дубовик // *Новости теплоснабжения*. – 2004. – № 11 (51). – С. 20–25.
5. Иванов, Ю. В. Основы расчета и проектирования газовых горелок [Текст] / Ю. В. Иванов. – М. : Изд-во Недра, 1972. – 272 с.
6. Джамал Абдель Карим Ибрагим Особенности рабочего процесса модуля газогорелочного устройства с поперечной подачей струй газа [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.01 / Джамал Абдель Карим Ибрагим ; КПИ. – К., 1997. – 20 с.
7. Абдулин, М. З. Изотермические исследования модулей горелочных устройств на основе струйно-нишевых систем [Текст] / М. З. Абдулин, А. А. Серый // *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків : НТУ «ХПИ», 2013. – Вып. 13. – С. 81 -88.
8. Абдулин, М. З. Струйно-нишевая система стабилизации и смесеобразования пламени [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.01 / Абдулин Михаил Загретдинович ; КПИ. – К., 1986. – 20 с.
9. Франк-Каменецкий Д. А. К теории микродиффузионного горения [Текст] / Д. А. Франк-Каменецкий // *Сб. науч. тр.* – М. : Оборонгиз, 1946. – С. 1 - 9.
10. Абдулин, М. З. Вітчизняні енергоефективні технології – запорука енергетичної безпеки держави [Текст] : моногр. / М. З. Абдулін, О. А. Сірий. – К. : Наук. думка, 2013. – С. 224 – 233.

Поступила в редакцію 07.06.14, рассмотрена на редколлегии 14.06.214

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. химического, полимерного и силикатного машиностроения А. Я. Карвацкий, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ КАМЕР ЗГОРЯННЯ

М. З. Абдулін, О. А. Сірий, А. М. Жученко

У статті розглянуто складні взаємозв'язки робочого процесу пальникових пристроїв на основі струменево-нішевої системи спалювання газоподібного палива. Наведено основні геометричні та режимні параметри системи, що дозволяють ефективно використовувати паливо в камерах згоряння вогнетехнічного обладнання. Основні результати отримані експериментальним шляхом. Дані по процесам змішування, часу перебування об'єму суміші, поля температур і швидкостей отримані розрахунковим методом із застосуванням методів обчислювальної газової динаміки. Виявлено вплив основних конструктивних факторів на показники робочого процесу.

Ключові слова: струменево-нішева технологія, пальники, камери згоряння, робочий процес.

PRINCIPLES OF WORKING PROCEDURE ORGANIZATION OF COMBUSTION CHAMBERS

M. Z. Abdulin, O. A. Siryi, A. M. Zhuchenko

The article deals with the complex relationships of working procedure of burners on basis of the spray and niche system of combustion gaseous fuel. It is showed the basic geometric and operating parameters of systems, which allow efficient utilize of fuel in the combustion chambers of fire equipment. The main results are obtained experimentally. Data of the mixing process, the residence time of the mixture volume, temperature and velocity fields are obtained by calculation using the methods of computational fluid dynamics. It was revealed the influence of the main structural factors on the working procedure of the combustion chambers and burning devises.

Keywords: spray and niche technology, burning devises, combustion chambers, working procedure.

Абдулин Михаил Загретдинович – канд. техн. наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок тепловых и атомных электрических станций, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: mزابdulin@gmail.com.

Серый Александр Анатольевич – ассистент кафедры теплоэнергетических установок тепловых и атомных электрических станций, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: Seruy_Alex@i.ua.

Жученко Андрей Михайлович – технический директор, Научно-Производственное Объединение «Струйно-нишевая технология», Киев, e-mail: nposnt@i.ua.цзшл