

УДК 621.311.22

**М.З. АБДУЛИН**, канд. техн. наук; доц. НТУУ «КПІ», Київ;  
**А.А. СЕРЫЙ**, аспірант НТУУ «КПІ», Київ

## ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЕЙ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ СТРУЙНО-НИШЕВЫХ СИСТЕМ

Проведено численне дослідження процесів гідродинаміки і смієєобразовання палива і окислювача в струйно-нишевій системі зжигання газообразного палива при одно- і двухрядній схемі газороздачі.

**Ключевые слова:** Струйно-нишевая система, рабочий процесс, смесеобразование, концентрационные пределы воспламенения, двухрядная подача топлива, математическое моделирование, горелочное устройство

### Введение

В энергетике Украины эксплуатируются сотни тысяч огнетехнических объектов (ОО), сжигающих природный газ. В общем топливном балансе страны газ занимает одно из первых мест наряду с нефтью и углем при уровне годового потребления до 60 млн. куб. м (по данным 2011 г). Это объясняется простотой транспортировки, организации и автоматизации рабочего процесса, высокой теплотой сгорания и на порядок меньшими капиталовложениями при строительстве в сравнении с объектами, работающими на угле. Кроме того, газ экологичнее всех органических топлив, сжигаемых в промышленных масштабах. Все это делает природный газ наиболее конкурентным топливом, несмотря на значительное подорожание. Кроме того, в последние десятилетия расширяется номенклатура источников газообразного топлива – шахтный метан, синтез-газ, биогаз, сланцевый газ и т.д.

Моральная и физическая изношенность ОО требует существенного повышения уровня эффективной работы. Это подразумевает повышение уровня экономичности, экологической безопасности, надежности работы, охраны труда, качества получаемой продукции и положительного социального эффекта.

Возможности отечественной экономики не позволяют широкомасштабно менять старое оборудование на новое. В последние годы найден перспективный путь выхода из сложившейся ситуации. Методом проб и ошибок определились технологии современного уровня, которые позволяют относительно быстро и малозатратно модернизировать ОО и обеспечить необходимые эксплуатационные показатели. К таким технологиям относится утилизация тепла, автоматизация технологического процесса, использование новых теплоизоляционных и жаростойких материалов и оптимизацию топочных процессов. Как показывает практика сжигания газообразных топлив, одним из важнейших элементов технологического процесса ОО является горелочное устройство (ГУ). Правильный его выбор, рациональная установка на агрегате, соблюдение условий эксплуатации решающим образом влияют на эффективность, а иногда и на работоспособность всего агрегата. Важно заметить, что работа горелочного устройства в целом определяется его конструкцией, работой вспомогательных узлов и элементов таких как: горелочная амбразура, система розжига и контроля факела, управление подачи топлива и окислителя, система безопасности [1].

Конструктивные и режимные факторы определяют основные закономерности рабочего процесса (РП) ГУ: рациональную раздачу горючего в потоке окислителя,

© М.З. Абдулин, А.А. Серый, 2013

смесеобразование, воспламенение, стабилизацию горения, выгорание топливной смеси и формирование продуктов сгорания необходимого качества. Сложность обеспечения высокой эффективности РП зависит от физико-химических свойств горючего. Природный газ в этом плане является низкорекреационным горючим и поэтому для эффективного сжигания требуется уделять повышенное внимание не только всем стадиям РП, но формированию механизма горения [2]. Необходимо сдвигать механизм горения в сторону т.н. «микродиффузионного».

В настоящее время в эксплуатации находятся сотни ГУ различных типов и широкого спектра по мощности (от десятков кВт до десятков МВт).

Как показывает анализ конструкций рабочего процесса существующих ГУ, спектр приемов организации рабочего процесса в них достаточно узок [3]. В основном это интенсивная закрутка потока окислителя, формирующая за ГУ циркуляционное течение с зоной обратных токов на расстоянии до 2–3 калибров амбразуры. Такая схема имеет ряд существенных недостатков, основные из которых: большое гидравлическое сопротивление по тракту окислителя, пульсации давления, заброс факела на экранные трубы, расслоение потоков воздуха и газа при интенсивной «закрутке» за счет разности плотностей компонентов горючей смеси.

Исходя из накопленного опыта применения горелочных устройств для различных типов ОО можно выделить основные универсальные требования, предъявляемые к ГУ в целом:

1) Легкий и надежный розжиг при минимально возможном расходе газа (для «безхлопкового» розжига котла и обеспечения плавного выхода огнетехнического объекта (ОО) из «холодного» в «горячее» состояние, либо просушивания ОО).

2) Устойчивое (безхлопковое) горение в широком диапазоне скоростей горючего и окислителя (для предотвращения срыва факела при резких колебаниях давления газа и воздуха).

3) Необходимый диапазон регулирования по мощности ( $K_p$ ) и коэффициенту избытка воздуха ( $\alpha$ ) (для обеспечения оптимальных режимов сушки футеровки и теплового состояния элементов ОО; необходимого качества продуктов сгорания и их температурного уровня; обеспечения регулировки мощности ОО без отключения части ГУ).

4) Максимально возможная полнота сгорания топлива ( $\eta_r$ ) в топочном объеме ОО.

5) Допустимый уровень эмиссии токсичных веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  и т.д.) во всем диапазоне нагрузок.

6) Возможность регулировки длины и светимости факела, а также его аэродинамической и концентрационной структуры (для обеспечения необходимой интенсивности и равномерности распределения тепловых потоков; уменьшения вероятности соприкосновения факела с элементами ОО, образования окислительной или восстановительной среды в продуктах сгорания).

7) Минимально возможное сопротивление по трактам горючего и окислителя (для обеспечения возможности работы при низких давлениях газа и воздуха, снижение расхода электроэнергии на привод тягодутьевых машин).

8) Надежность и простота регулирования режимов работы (для упрощения автоматизации и обеспечения безопасности).

9) Возможность надежной работы на самотяге и в безвентиляторном режиме на частичных нагрузках за счет разряжения, создаваемого дымососом либо трубой, что

является важным при аварийных отключениях тягодутьевых средств, а также позволяет существенно экономить электроэнергию.

10) Постоянство показателей рабочих характеристик в процессе эксплуатации.

11) Низкий уровень шума.

12) Модульность, позволяющая набирать ГУ необходимой мощности из автономно работающих модулей.

13) Технологичность, простота изготовления, низкая металлоемкость, отсутствие потребности в дорогих материалах.

Необходимо также отметить, что спектр этих требований постоянно расширяется, а нормы (в частности экологические) ужесточаются. В настоящее время ни одно ГУ включая лучшие образцы зарубежных фирм не удовлетворяет этим требованиям в комплексе.

Единых подходов для создания высокоэффективных ГУ пока не выработано. Единственной методикой расчета ГУ на сегодняшний день остается методика Ю.В. Иванова, основным преимуществом которой является рациональная раздача горючего в потоке окислителя [4]. Огромный массив исследований позволил Ю.В. Иванову определить наиболее эффективный способ газораздачи путем внедрения системы струй горючего перпендикулярно потоку окислителя. При этом были заложены основы расчета глубины проникновения и траектории струй в сносящем потоке.

Отсутствие знаний о закономерностях образования циркуляционных течений за рядами струй и особенности смесеобразования в ближнем следе существенно повлияло на результаты применения многорядной системы газораздачи. Необходимо заметить, что закономерности развития струй в сносящем потоке при однорядном расположении успешно используются в струйно-нишевой технологии сжигания (СНТ) [5].

### **Постановка задачи и методика проведения исследований**

Задачей проведенных исследований является изучение закономерностей течения и смесеобразования горючего и окислителя в струйно-нишевой системе в изотермических условиях при различных вариантах подачи газа. Рассмотрению подлежала газораздача топлива круглыми струями, подаваемыми перпендикулярно в сносящий поток окислителя через однорядную и двурядную систему отверстий.

Многорядная система струй организовывается следующим образом: два ряда отверстий располагались один за другим с разными диаметрами, причем ряд отверстий с большим диаметром располагается первым по потоку воздуха с целью обеспечения большей дальности, а струи топлива второго ряда с меньшим диаметром должны заполнять пространство под основными струями, обеспечивая при этом более эффективное распределение топлива по всему объему воздушного потока см. рис. 1 [6].

Кроме того, такая система могла быть призвана для увеличения единичной мощности горелочных устройств за счет увеличения количества газоподающих отверстий.

В качестве метода проведения исследований выбрано компьютерное моделирование. Расчетная область представляет собой канал с нишей, перед которой, по потоку воздуха, располагается два ряда газовых отверстий см. рис. 2. Процессы, моделируемые при численных расчетах, включают решение системы дифференциальных уравнений движения, неразрывности и переноса  $i$ -го компонента смеси см. (1)–(4). Как показали сравнительные исследования смесеобразования в реальном рабочем процессе ГУ и при отсутствии химического реагирования,

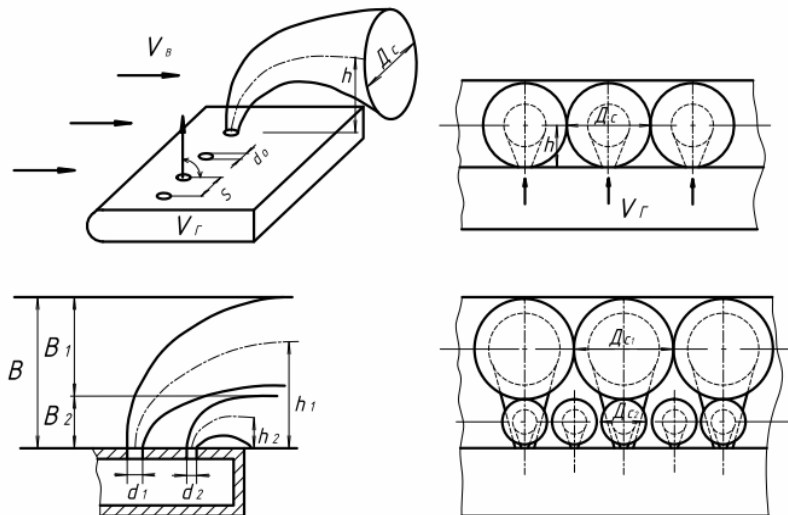


Рис. 1 – Однорядная и двухрядная система газороздачи

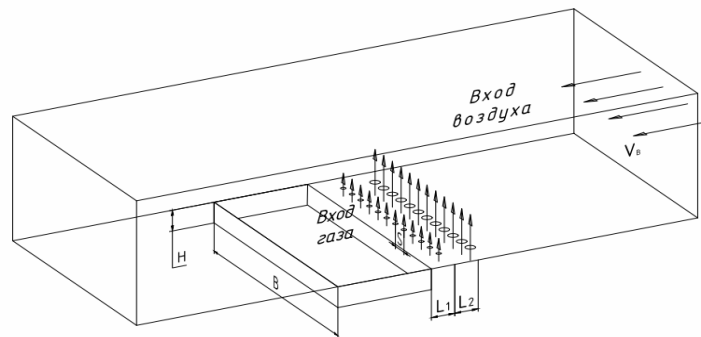


Рис. 2 – Струйно-нишевая система с двумя рядами топливных отверстий

изотермические эксперименты с достаточной достоверностью характеризуют процессы течения и смесеобразования [7]. Диапазон исследований выбран исходя из условий рабочего процесса ГУ при промышленной эксплуатации. Так режимные и геометрические параметры задавались следующими: скорость воздуха на входе в канал

$V_B = 10$  м/с; гидродинамический параметр  $\bar{q} = \frac{\rho_r \cdot W_r^2}{\rho_B \cdot W_B^2}$  задавался в диапазоне от 0,1 до

20; длина и глубина ниши  $L = 40$  и  $h = 10$  мм; ширина и высота воздушного канала  $B = 80$  мм,  $H = 60$  мм; шаг газоподающих отверстий  $S = 3,2$ ; шаг рядов газоподающих отверстий 15 мм; диаметры первого и второго ряда  $d_1$  и  $d_2$  варьировались в пределах: 1–6 мм.

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

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

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

$$\frac{\partial \rho_K}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_K U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v}{Sc_K} + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial \rho_K}{\partial x_j} + R_K, \quad K = 1, 2, 3 \dots K-1; \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right), \quad (4)$$

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.

Замыкание системы уравнений производилось с помощью двухпараметрической модели турбулентности  $k$ – $\varepsilon$  [8].

#### Анализ результатов численных экспериментов

Далее приведены результаты верификации математического моделирования процессов смешения газа с воздухом при изотермических продувках (использованы данные экспериментальных исследований, проведенных в условиях струйно-нишевой системы) рис. 3–4. Как видно, используемая модель дает удовлетворительные результаты.

Согласно полученным данным (рис. 5а) состав топливной смеси в области стабилизации горения находится в концентрационных пределах воспламенения во всем исследованном диапазоне изменений гидродинамического параметра  $\bar{q}$ , а соответственно и расхода горючего. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований [9] и испытаниями ГУ в условиях промышленной эксплуатации.

В случае двухрядной системы струй горючего заметно значительное сужение диапазона горючих концентраций топливной смеси по гидродинамическому параметру, что снижает коэффициент рабочего регулирования ГУ (рис. 5б). Полученные результаты численных исследований подтверждаются результатами экспериментов процессов горения, проведенных для двухрядных систем. В результате натурных испытаний установлено, что смесь воспламенялась в нишевой полости при  $\bar{q} \leq 0,5$ , дальнейшее увеличение истечения скорости газа приводило к богатому срыву пламени.

Для двухрядных систем состав топливной смеси по нише находится в концентрационных пределах воспламенения при наименьших  $d_2$  см. табл. В ситуациях с  $d_2 \approx d_1$  смесь в нише имеет меньшую концентрацию метана. Это, очевидно, объясняется увеличением значения дальности пары струй в результате их совместного слияния рис. 4. Таким образом, в двухрядной системе в рассмотренном диапазоне значений допущение о том, что второй ряд струй будет заполнять чистое воздушное пространство под основными струями, в какой-то степени реализуется только в случае выполнения условия  $d_1/d_2 = 3$ . Следуя данному утверждению, рассмотрим характеристики процессов смесеобразования и гидродинамики для двухрядных систем газораздачи с различными диаметрами отверстий в сравнении с однорядной раздачей газа в поток окислителя.

Таблица

Значения среднего по объему ниши коэффициента избытка воздуха для двух схем газораздачи при варьировании диаметров отверстий первого и второго ряда  $\bar{q} = 20$

Коэффициент избытка воздуха	Геометрические характеристики, мм											
	$d_1$	$d_2$	$d_1$	$d_2$	$d_1$	$d_2$	$d_1$	$d_2$	$d_1$	$d_2$	$d_1$	$d_2$
	3	1	3	2	3	3	6	2	6	4	6	6
$\bar{\alpha}$ , 2-х рядная схема	0,56		0,253		0,5		0,66		0,41		0,35	
$\bar{\alpha}$ , однорядная схема	0,6		0,56		0,6		1,7		0,78		1,3	

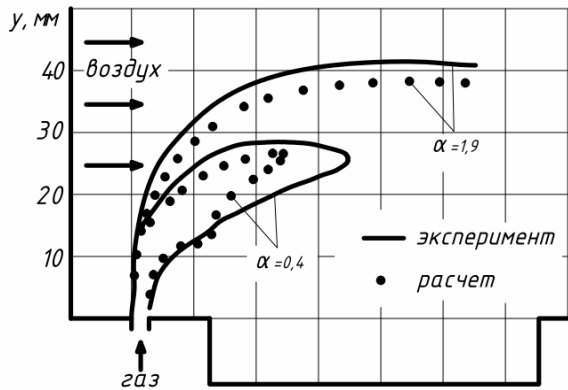


Рис. 3 – Поля коэффициента избытка воздуха в струйно-нишевой системе при изотермических продувках:  $V_b = 20$  м/с;  $S = 3$ ;  $d = 2$  мм;  $L/H = 75/15$ ;  $q = 54$  [2]

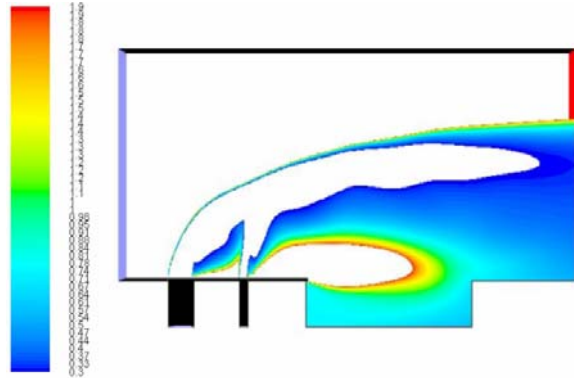


Рис. 4 – Поля коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при двухрядной газораздаче в сечении, проходящем через оси топливных отверстий при  $d_1 = 3$ ;  $d_2 = 1$  мм;  $W_b = 10$  м/с;  $q = 10$

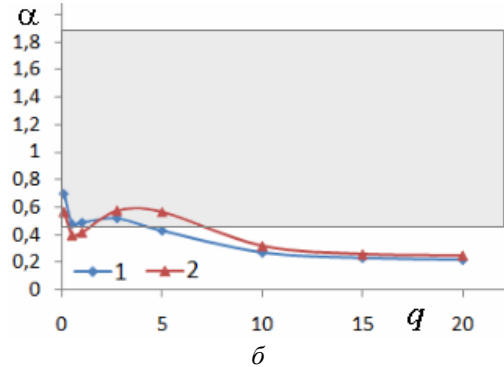
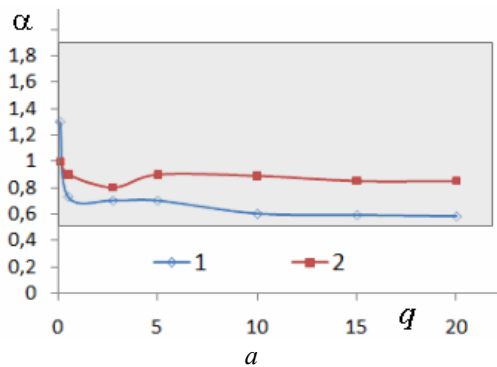


Рис. 5 – Зависимость коэффициента избытка воздуха по нише в зависимости от гидродинамического параметра для однорядной подачи (а) и двухрядной подачи (б) для различных значений диаметров газоподающих отверстий, мм: а – 1 –  $d_1 = 3,16$ ; 2 –  $d_1 = 4,75$ ; б – 1 –  $d_1 = 2,9$ ,  $d_2 = 1$ ; 2 –  $d_1 = 4,3$ ,  $d_2 = 1,4$  (прямоугольной областью ограничены концентрационные пределы воспламенения природного газа)

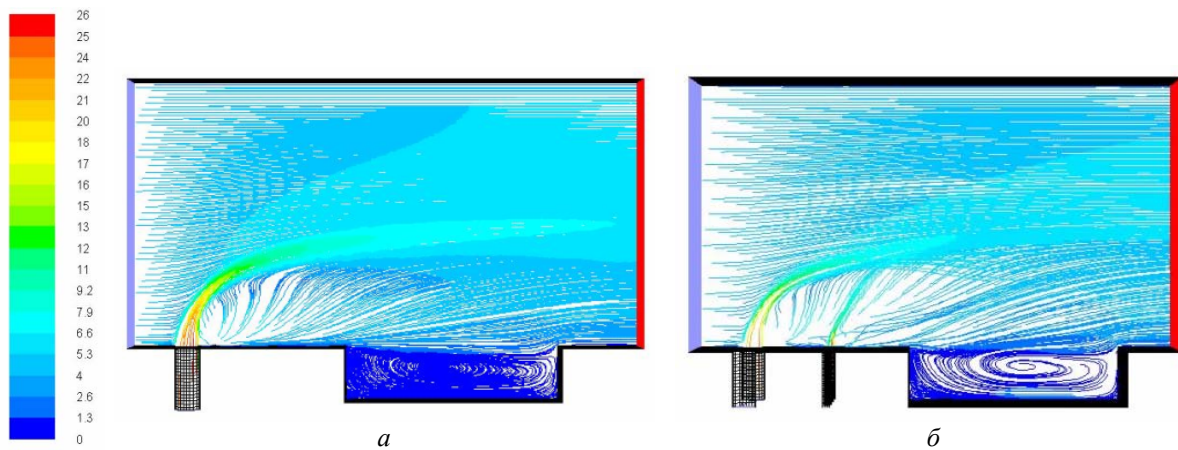


Рис. 6 – Картины линий тока в струйно-нишевой системе в сечении, проходящем через середину газоподающих отверстий с характеристиками, мм: а –  $d = 4,75$ ,  $q = 15$ ; б –  $d_1 = 4,3$ ,  $d_2 = 1,4$ ;  $q = 15$

Особый интерес представляет определение закономерностей образования зоны циркуляционного течения, как в самой нише, так и в области за струями. Анализ процессов смесеобразования показывает, что циркуляционное течение в нишевой полости возникает на всех режимах и во всем диапазоне рассмотренных геометрических характеристик. Циркуляционное же течение в области под струями

образується при значеннях гидродинамического параметра  $\bar{q} \geq 2$ . Данный факт влияет на процесс смешения в нишевой полости следующим образом: при увеличении значения гидродинамического параметра  $\bar{q}$  (в данном случае увеличивается скорость истечения газа) процессы смесеобразования в зоне стабилизации пламени являются автомодельными, то есть средний уровень концентрации газа по объему ниши при изменении режима работы системы остается практически неизменным. Автомодельность процессов характерна как для однорядной (рис 5а) так и для двухрядной системы (рис 5б). Наличие минимума коэффициента избытка воздуха в диапазоне значений гидродинамического параметра от 0,5 до 2 объясняется «прилипанием» струй к стенке в области истечения газа из отверстий, вызванного эффектом Коанда, и сопровождается незначительным увеличением концентрации топлива в нише.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что однорядная подача в отличие от двухрядной обеспечивает необходимый горючий уровень концентраций топливной смеси и устойчивую управляемую аэродинамическую структуру течения в области стабилизации процесса горения в широком диапазоне исследований. Данное явление объясняется негативным влиянием ввода второго ряда струй в зону циркуляционного течения, выполняющего важную задачу образования горючей смеси нужного качества в нишевой полости и стабилизации пламени (рис 6а, б). Из результатов проведенных исследований видно, что при размещении рядов отверстий на расстоянии 15 мм с соотношением  $d_2/d_1 = 3$ , второй ряд струй находится в тени влияния первого ряда, что в последствии приводит к слиянию струй. Численное моделирование процессов, проходящих в струйно-нишевой системе, при увеличении расстояния между рядами газоподающих отверстий до  $L_2 = 30$  мм, при неизменном расстоянии  $L_1 = 15$  показали, что образуемая смесь в зоне нишевой полости перенасыщена топливом и при значениях  $q > 5$  выходит за пределы горючих концентраций для всех рассмотренных геометрических характеристик системы.

#### **Выводы**

1 Проведено численное моделирование процессов гидродинамики и смесеобразования в струйно-нишевой системе для реальных условий эксплуатации ГУ.

2 На основе экспериментальных данных и численного моделирования проведено тестирование двухрядной схемы газораздачи для различных значений ее геометрических характеристик.

3 Показана эффективность газораздачи однорядной системой струй в широком диапазоне изменений режимных параметров ГУ за счет обеспечения:

- устойчивой циркуляционной зоны в ближнем следе за системой струй;
- наличия постоянного уровня горючей концентрации топливной смеси в области стабилизации процесса горения.

4 Показаны возможности повышения уровня эффективности газораздачи двухрядной системой струй за счет обеспечения устойчивости аэродинамической структуры в ближнем следе газоподающих отверстий при подборе соответствующих геометрических и режимных факторов.

**Список литературы:** 1. Винтовкин, А.А. Современные горелочные устройства [Текст] / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев. – М.: Машиностроение-1. – 487 с. 2. 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. 3. Абдулин, М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках [Текст] / М.З. Абдулин //

Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – 2005. – № 6. – С. 130-144. 4. *Абдулин, М.З.* Оптимизация топочного процесса – путь к повышению эффективности, экологической безопасности и надежности работы котлов [Текст] / М.З. Абдулин, И.П. Овсиенко, Г.Р. Дворцин, А.М. Жученко, Ю.А. Кулешов // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 4. – С. 31-35. 5. *Абдулин, М.З.* Горелочное устройство на основе саморегулирующейся системы смесеобразования и стабилизации пламени [Текст] / М.З. Абдулин, Г.Р. Дворцин, И.Б. Тепляков, В.Н. Строкин // Труды IV международной научно-технической конференции «Комплексная автоматизация промышленности». – 1990. – С. 12-16. 6. *Иванов, Ю.В.* Основы расчета и проектирования газовых горелок. – М.: Недра, 1972. – 272 с. 7. *Христич, В.А.* Исследование некоторых закономерностей развития диффузионной горячей газовой струи в турбулентном следе трехмерного стабилизатора [Текст] / В.А. Христич, Г.Н. Любчик // Вестник КПИ. Серия: Теплоэнергетика. – 1964. – № 1. – С. 30-39. 8. *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. 9. *Абдулин, М.З.* Струйно-нишевая технология сжигания топлива на объектах муниципальной энергетики [Текст] / М.З. Абдулин, В.С. Дубовик // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 6. – С. 20.

*Поступила в редколлегию 12.01.13*

УДК 621.311.22

**Исследование рабочего процесса горелочных устройств на основе струйно-нишевых систем** [Текст] / **М.З. Абдулин, А.А. Серый** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 13(987). – С. 81-88. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X.

Виконано числове дослідження процесів гідродинаміки та сумішоутворення пального та окисника у струменево-нішовій системі спалювання газоподібного палива при одно- та дворядній схемі газороздачі.

**Ключеві слова:** струменево-нішова система, робочий процес, сумішоутворення, концентраційні межі займання, дворядова подача палива, математичне моделювання, пальниковий пристрій.

It was carry on numerical investigation the processes of hydrodynamics and mixing of fuel and oxidizer in a jet- niche system burning gaseous fuel with supplying gas throw single and double raw of fuel round holes.

**Keywords:** jet- niche system, working procedure, mixing, explosion limit, duplex fuel supply, mathematical modeling, burner device.