

УДК 621.452.3

Г.А. МИКУЛИН, Г.Н. ЛЮБЧИК

МАССОБМЕННЫЕ СВОЙСТВА И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБЧАТЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ГОРЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ

Введение. В последние годы в топочной технике наметилась тенденция широкого применения приемов сжигания газообразного топлива с использованием прямоточных (трубчатых) элементов интенсификации смешения и горения, способствующих стабилизации пламени, созданию микрофакельной структуры зоны горения, формированию внутренних рециркуляционных течений, а также снижению эмиссии токсичных оксидов азота (NO_x) и углерода (CO).

В этом направлении характерными являются разработки, выполненные Магдебургским Университетом (Германия) [1] и Институтом газовой технологии (IGT, США) [2,3]. В первом случае в основу конструкции горелки положена технология COSTAIR (Continued Staged Air with Internal Recirculation), особенностью которой является применение струйно-распределенной подачи воздуха с внутренней рециркуляцией продуктов сгорания. Во втором случае, на основе технологии FIRB (Forced Internal Recirculation Burners), также созданы горелки с принудительной внутренней рециркуляцией продуктов сгорания.

Обе технологии являются технологиями - аналогами не только по причине реализации эффекта внутренней рециркуляции продуктов сгорания к корню факела, но и из-за использования в них для интенсификации процесса горения различных модификаций трубчатых (или конических) насадок.

В результате применения технологий COSTAIR и FIRB в составе топок котлов достигается существенное снижение эмиссии оксидов азота (до уровня $70 \dots 80 \text{ мг/м}^3$ при $\text{O}_2 = 3\%$) [1]. По этому показателю они успешно конкурируют с более сложными технологиями, основанными на применении различных завихрителей в сочетании с многоступенчатой подачей топлива и дутьевого воздуха при частичном предварительном их смешении [4].

К недостаткам технологий COSTAIR и FIRB следует отнести то, что применяемое в них широкое многообразие насадок различной

геометрической конфигурации не всегда технически оправдано и научно обосновано. Это приводит к заметной громоздкости конструктивных решений, непредсказуемости интегральной картины течения в зоне горения, в результате чего возникает необходимость в проведении специальных доводочных работ, создаются определенные трудности в тиражировании типоразмеров горелочных систем на различную производительность. Кроме того, названные технологии имеют ограниченную область применения - топки котлов и промышленных теплогенераторов, работающих при избытках воздуха, близких к единице.

Функциональное назначение элементов трубчатого модуля. Исследованиями, выполненными в НТУУ "КПИ" [5,6], установлено, что успешность применения "трубчатых технологий" во многом определяется наличием четких представлений об аэродинамической структуре потока в трубчатых элементах соответствующей конфигурации, обоснованных методов оценки их аэродинамических характеристик (в том числе характеристик аэродинамического сопротивления, что особенно важно для камер сгорания ГТУ) и научно-обоснованных физических представлений о массообменных свойствах турбулизирующих насадок.

Эффективная реализация трубчатой технологии (как в горелках котлов, так и в камерах сгорания ГТУ) возможна при максимальном наборе из трех последовательно включенных типовых прямоточных трубчатых элементов (рис. 1): внезапного сужения (контур I), внезапного расширения (контур II - насадок Борда) и плавного сужения (контур III).

Каждый из рассматриваемых элементов имеет свое функциональное назначение. Так, входной элемент (в виде внезапного сужения - контур I), способствует организации дозированного ввода потока окислителя в зону горения. Максимальное сечение данного элемента ($F_{\text{вх}}$) может соответствовать его минимальному сечению ($F_{\text{вх}}=F_1$) для одиночных

(изолированных) ТМ или максимальному сечению насадка Борда ($F_{вх}=F_2$) в случае выполнения горелочного устройства в виде полинасадочного блока, состоящего из параллельно включенных одиночных ТМ. В случае разделения воздуха на первичный и вторичный (камеры сгорания ГТУ и ПГУ) необходимым компоновочным требованием является $F_{вх} > F_2$.

Элемент в виде внезапного расширения потока (контур II) может выполняться в мононасадочном или полинасадочном варианте и в каждом случае является основным элементом интенсификации смесеобразования и горения, а также элементом стабилизации пламени. Для данного элемента всегда должно выполняться условие $F_1 < F_2$.

Следующий элемент по течению потока (в виде плавного сужения - контур III) имеет вспомогательное назначение как элемент, формирующий необходимую геометрическую конфигурацию и кинематическую структуру потока продуктов сгорания на выходе из ТМ ($W_{вых} > W_2$). При условии $W_{вых} = W_2$ отпадает необходимость в применении данного элемента.

В составе трубчатого модуля между контурами I и II расположен дополнительный элемент (контур IV), который выполняет важную функцию топливного коллектора и обеспечивает многовариантную подачу топливного газа на смесеобразование [7-9].

Выбор рассматриваемого набора трубчатых элементов (рис.1) не случаен и определяется особенностями аэродинамической структуры образованными ими течений. Так, дозирующий эффект внезапного сужения определяется очевидными конструктивными соображениями,

имеющими место при многоканальной компоновке горелки, и эффектом сжатия потока в тупиковой зоне контура I. В результате этого выравнивается профиль скоростей воздушной струи перед участком смесеобразования, что особенно важно при полинасадочном варианте выполнения горелки. Применение плавного сужения на выходе определяется необходимостью получения однородной кинематической структуры потока при условии минимальной потери полного давления.

Физическое моделирование аэродинамических характеристик. В связи с тем, что типовой трубчатый модуль состоит из последовательно включенных трубчатых элементов очень важным условием его использования в составе горелочных устройств является знание соответствующей характеристики аэродинамического сопротивления. Несмотря на различную конфигурацию проточной части данных элементов, следуя за Альтшулем [10], можно описать физическую картину течения в каждом из данных элементов на основе общей физической модели с использованием теоремы Борда. Так, при внезапном сужении потока основная составляющая потерь энергии приходится не на тупиковую часть контура I (как это часто предполагается), а на входную часть внутреннего канала (сечение F_1). Это объясняется тем, что при конфузорном течении практически отсутствует отрыв пограничного слоя от стенок канала и имеет место плавное искривление периферийных линий тока с образованием незначительной завихренности в тупиковой части контура I. В этом случае периферийные линии тока

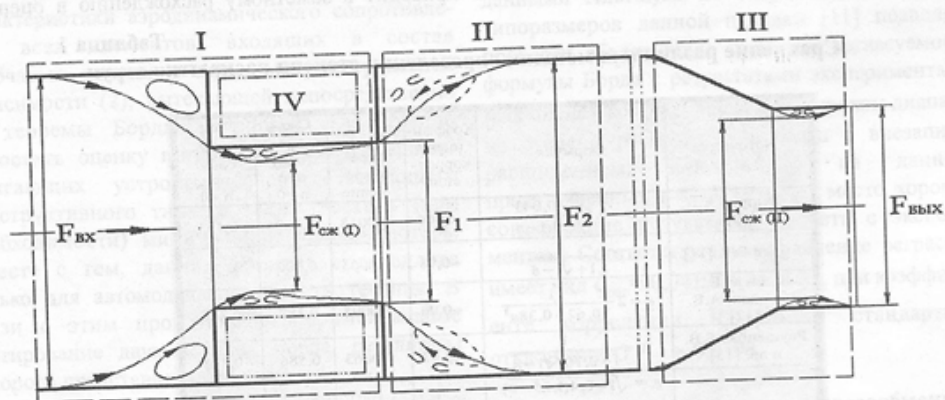


Рис. 1. Схема трубчатого модуля:

I - элемент с внезапным сужением; II - элемент с внезапным расширением; III - элемент с плавным сужением; IV - топливный коллектор.

непрерывной кривизны из-за возникающего центробежного ускорения частиц потока приводят к отрыву потока от стенок внутреннего канала, что вызывает сжатие струи ($F_{сж(I)} < F_1$) и появление эффекта внезапного расширения струи в узком сечении элемента. Таким образом, конечная картина течения трансформируется в течение, эквивалентное течению за насадком с внезапным расширением.

В свою очередь, аэродинамическая картина течения в контуре II (по определению) эквивалентна течению за насадком с внезапным расширением.

Что касается течения в контуре III, то и в этом случае (как и в контуре I) в результате возникновения радиальной составляющей скорости в периферийной зоне потока также происходит сжатие струи ($F_{сж(III)} < F_{вых}$), что также соответствует структуре течения при внезапном расширении. Таким образом, для всех элементов ТМ при определении их аэродинамических сопротивлений может быть использована теорема Борда, в соответствии с которой потери давления (напора) пропорциональны квадрату потерянной скорости, то есть:

$$\Delta p_o = (W_{max} - W_{min})^2 \quad (1),$$

где W_{max} и W_{min} – соответственно максимальная и минимальная скорости в канале с внезапным расширением.

Если отнести потерю давления к кинетической энергии потока в минимальном его сечении, то соответствующий коэффициент гидравлического сопротивления будет иметь вид:

$$\zeta = \frac{\Delta p_o}{\rho W_{max}^2} = (1 - \varepsilon)^2, \quad (2)$$

где $\varepsilon = F_{сж(I)}/F_1$ – коэффициент сжатия струи в узком сечении элемента с внезапным сужением, которая зависит от геометрического параметра элемента - $n = F_1/F_{вх}$.

Таким образом, определение потерь давления сводится к оценке коэффициента сжатия струи (ε). В специальной литературе [10-14] приводятся различные методики оценки данного параметра (см. табл.1), суть которых сводится к определению функциональной связи $\varepsilon = f(n)$. Как видно из табл. 1, известные рекомендации дают существенное расхождение предельных значений коэффициента аэродинамического сопротивления: от $\zeta_{max} = 0,086$ (по данным [14]) до $\zeta_{max} = 0,376$ (по данным [12]).

С использованием известных экспериментальных данных [10] проведен сравнительный статистический анализ методик, представленных в табл.1. При этом установлено, что по всем показателям регрессионного анализа формула А.Д. Альтшуля имеет существенные преимущества по сравнению с уравнениями других авторов: максимальное значение коэффициента корреляции ($R \approx 0,99$), минимальное стандартное отклонение ($\sigma \approx \pm 0,0018$), близкие к осредненным (по всем источникам) значения минимального раскрытия струи (ε_{min}) и коэффициента аэродинамического сопротивления (ζ_{max}) при $n=0$. При этом следует подчеркнуть, что небольшое (на первый взгляд) расхождение в оценках степени сжатия (ε) приводит к заметному расхождению в оценках

Таблица 1
Сравнение различных методик определения степени раскрытия струи

Источник	Формула	Коэффициент корреляции	Стандартное отклонение	Сжатие (ε_{min}) при $n=0$	Коеф. сопр. (ζ_{max}) при $n=0$
Альтшуль А.Д. [10]	$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1-n}$	-0,99	0,0018	0,609	0,153
Емцев Б.Т. [11]	$\varepsilon = \frac{1}{1+\sqrt{1-n}}$	-0,98	0,0065	0,500	0,25
Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. [12]	$\varepsilon = 2 - \frac{1}{0,62+0,38n^2}$	-0,98	0,0095	0,387	0,376
Раушенбах Б.В. и др. [13]	$\varepsilon = \frac{1}{1+0,707\sqrt{1-n}}$	-0,97	0,0063	0,586	0,171
Реггу Ж.Н. [14]	$\varepsilon = \sqrt{1-0,4(1,25-n)}$ при $n \leq 0,715$ $\varepsilon = \sqrt{1-0,75(1-n)}$ при $n > 0,715$	-0,94	0,0140	0,707	0,086
Осредненные значения параметров		-0,97	-0,008	-0,560	-0,2

коэффициента гидравлического сопротивления (ζ). Таким образом, можно признать методику Альтшуля А.Д. как наиболее достоверную при оценках аэродинамического сопротивления элемента с внезапным сужением. При этом формулу (1) можно использовать и при определении аэродинамического сопротивления элементов с внезапным расширением и с плавным сужением. Только в первом случае вместо характеристики раскрытия струи (ε) следует использовать степень раскрытия насадка

Борда ($\bar{f} = F_1/F_2$). Во втором случае (в соответствии с рекомендациями [10]) необходимо учитывать эффект смягчения входа (К), который зависит от угла конусности конфузора - α (см. рис.1). На основании анализа экспериментальных данных Альтшуля А.Д. [10] предлагается экстраполяция характеристики $K=f(\alpha)$ в следующей форме:

$$K = 1 - 0,81 \sin \frac{2(\pi - \alpha)}{3}$$

Тогда для конфузора (в диапазоне $\alpha = \pi/4 \dots \pi$) степень раскрытия струи в узком канале $\varepsilon = F_{\text{сж}}(\pi)/F_{\text{вых}}$ будет определяться из соотношения:

$$\varepsilon = 1 - \left(0,43 - \frac{0,043}{1,1-n}\right) \sqrt{K}, \quad (3)$$

которое при $\alpha = \pi$ (т.е. при внезапном сужении) трансформируется в формулу Альтшуля А.Д. (см. табл.1).

Установленная возможность описания характеристики аэродинамического сопротивления всех элементов, входящих в состав трубчатого модуля, с помощью универсальной зависимости (2), вытекающей непосредственно из теоремы Борда, позволяет существенно упростить оценку потерь давления в топливосжигающих устройствах соответствующего конструктивного типа, а также достичь (при необходимости) минимизации данных потерь. Вместе с тем, данная формула справедлива только для автомодельной области течения. В связи с этим проведено экспериментальное тестирование двух насадок Борда, результаты которого представлены на рис.2.

Тестирование в диапазоне чисел Рейнольдса

$$Re = \frac{W_1 d_1}{\nu} = (1,6 \dots 12) \times 10^4$$

отображает существование трех традиционных зон течения: ламинарной, переходной и турбулентной (автомодельной). Граница начала автомодельной области течения смещается в левую часть $\zeta - Re$ диаграммы при уменьшении степени раскрытия струи.

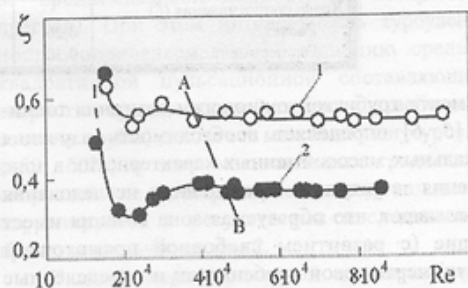


Рис.2. Результаты аэродинамического тестирования элемента с внезапным расширением:

1 - насадка (36/69) при коэффициенте раскрытия

$$\bar{f} = 0,272;$$

2 - насадка (36/57) при коэффициенте раскрытия

$$\bar{f} = 0,399;$$

А-В - граница автомодельной области течения.

Однако критические значения чисел Рейнольдса одного порядка для насадок с различным раскрытием ($Re_{кр} \approx 3,8 \times 10^4$ при $\bar{f} = 0,272$ и $Re_{кр} \approx 4,6 \times 10^4$ при $\bar{f} = 0,399$) указывают на реализацию в реальных условиях работы топливосжигающих устройств автомодельной области течения.

Проведенное тестирование двух типоразмеров насадок Борда в совокупности с известными данными Альтшуля по сопротивлению других типоразмеров данной насадки [11] позволяет провести объективную проверку согласованности формулы Борда с результатами экспериментальных оценок коэффициента ζ в широком диапазоне степени раскрытия элемента с внезапным расширением. Как видно из данных, представленных в табл.2, имеет место хорошее согласование результатов расчета с экспериментом. Соответствующее уравнение регрессии имеет вид $\zeta_{\text{рас}} = -0,0419 + 1,0624 \zeta_{\text{экс}}$ при коэффициенте корреляции $R \approx 1,0$ и стандартном отклонении $\sigma \approx \pm 0,0198$.

Структура потока и массообменные характеристики. Особенности использования насадка с внезапным расширением как основного

Таблица 2
Сравнение расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту сопротивления насадки Борда

Характеристика	Данные Альтшуля [11]				Данные НТУУ «КПИ» (рис.2)	
	0,489	0,26	0,0816	0,002	0,399	0,272
Степень раскрытия (\bar{f})	0,489	0,26	0,0816	0,002	0,399	0,272
Кэф. сопротивления (ζ):						
Расчет	0,26	0,548	0,843	0,996	0,361	0,530
Эксперимент	0,30	0,55	0,80	1,0	0,369	0,548

элемента трубчатой технологии сжигания топлива [5, 6] определяет необходимость изучения локальных массообменных характеристик в зоне течения за уступом. Проведенные исследования показывают, что образуемая зона течения имеет общие (с развитием свободной прямоточной струи) черты, свои особенности и определенные отличия.

Общими чертами со структурой свободной осесимметричной струи являются: наличие ядра потока, начального и основного участка, расширяющегося пограничного слоя, градиентного поля скоростей во всей области течения (за исключением ядра струи) и максимума скорости на оси. При этом длина начального участка практически совпадает с оценочной длиной свободной осесимметричной струи ($S_0 = 0,67R_0/a$, где $R_0 = d_1/2$ – радиус струи) при коэффициенте структуры струи $a=0,07$. Как и в случае неограниченной прямоточной струи [15], в ядре течения реализуются слабые пульсационные возмущения скорости при уровне относительной интенсивности турбулентности:

$$K_r = 100\% \frac{\sqrt{W'^2}}{|W|} < 5\% ,$$

где $\sqrt{W'^2}$ – среднеквадратическая пульсационная составляющая скорости;

$|W|$ – модуль осредненной во времени локальной скорости, а зона сильных пульсаций ($K_r > 5\%$) сосредоточена в пограничном слое.

В обоих случаях максимальная интенсивность турбулентности фиксируется в середине пограничного слоя.

На этом общие черты исчерпываются и имеют место существенные расхождения

структуры потока в канале насадки Борда по сравнению со свободной осесимметричной струей (рис.3-а). Если свободная струя характеризуется асимптотическим изменением скорости по радиусу в любом сечении, то профиль скорости на начальном участке струи в насадке Борда изменяется более радикально. В результате образуется обратное течение на периферии потока: между прямым и обратным током фиксируется линия нулевых скоростей и по причине возникновения циркуляционного течения (длина которого практически совпадает с длиной начального участка) образуется тороидальный вихрь в прикорневой зоне.

Все это одновременно с воздействием бокового ограничения течения приводит к деформации внешней границы пограничного слоя в канале насадки Борда, положение которой на основном участке совпадает с внешним диаметром канала (d_2), а при увеличении продольной координаты (x) профиль скорости в поперечном сечении выравнивается и течение преобразуется в обычное течение в канале.

Область течения, где достигается максимальный уровень турбулентности ($K_r = K_r^{max}$) на основном участке, расположена на радиусе, разделяющем данное сечение на две приблизительно одинаковые по площади зоны. Интенсивность турбулентности в канале насадки Борда намного превышает аналогичный показатель не только для прямоточной, но и для закрученной струи (рис.3-б).

Корреляция с другими исследованиями

Приведенные данные по структуре турбулентности хорошо коррелируются с исследованиями других авторов, полученными при изучении ограниченных струйных течений [16-18].

Так, в работе Ивлева В.И., Гольденберга С.А. [16], где впервые исследовано влияние турбулизирующих решеток* на характе-

* Турбулизирующие решетки представляли собой многоканальную насадку Борда за счет установки в поперечном сечении потока перфорированных пластин диаметром 28 мм.

ристики турбулентности потока в трубе диаметром 32 мм, показано, что уровень относительной интенсивности турбулентности в центральной части трубы (без турбулизаторов) составляет 4...6%, а в пограничном слое возрастает до ~14% и более. При установке же струйных турбулизаторов в ядре потока происходит существенное повышение интенсивности турбулентности, которое на расстоянии одного калибра диаметра трубы (32 мм) достигает 11...14%. Данный показатель при изменении средней скорости в диапазоне 12...44 м/с практически остается постоянным, что указывает на автомодельность течения в диапазоне изменений чисел Рейнольдса $Re > 2,6 \times 10^4$.

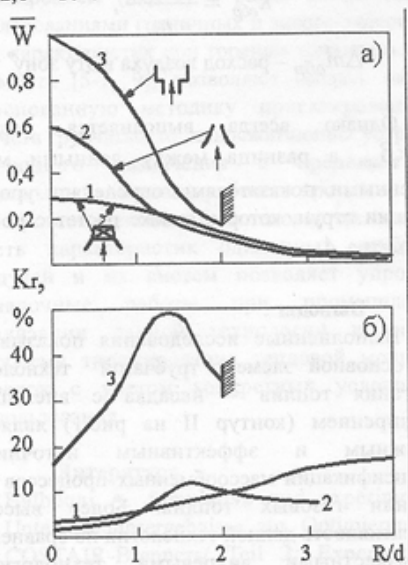


Рис.3. Распределение осевой составляющей скорости (а) и интенсивности турбулентности (б) по радиусу струй при $x/d = 5$:

- 1 – истечение закрученной струи из конфузурной насадки в неограниченный объем;
- 2 – истечение прямоочной струи из конфузурной насадки в неограниченный объем;
- 3 – прямоочная струя в канале с внезапным расширением ($d_1 = 36$ мм, $d_2 = 69$ мм).

Данные исследования по структуре турбулентности также хорошо коррелируются с известными исследованиями, выполненными в Институте технической теплофизики НАН Украины [17, 18]. В качестве интенсификаторов турбулентности также использовались перфорированные пластины (или шайбы [17]), устанавливаемые в цилиндрической трубе. Так, в работе [18], где указанные элементы названы перфорированными преградами (диаметром 70 мм

с тремя симметрично расположенными отверстиями диаметром 28 мм), установлено существование в затененной зоне между отверстиями перфорации обратного течения с максимальным уровнем осевой составляющей скорости, достигающим 60% от среднемассовой скорости в свободном сечении трубы (что составляет ~30% от среднемассовой скорости в отверстиях преград). При этом интенсивность турбулентности (определяемая по отношению среднеквадратичной пульсационной составляющей скорости к среднемассовой скорости в свободном сечении трубы) достигает максимального уровня (~50...60%) в зоне максимальных градиентов скоростей (т.е. в пограничном слое), что также коррелируется с результатами исследований, представленными на рис.2.

Важной характеристикой интенсивности массообменных процессов является путь смешения, который в соответствии с теорией Прандтля определялся по опытным данным на основании соотношения:

$$\sqrt{l'^2} \approx \frac{\sqrt{W'^2}}{\frac{\Delta W}{\Delta R}}$$

где ΔW – разница осредненных скоростей на радиальном отрезке ΔR .

Характеристики

$$\sqrt{l'^2} = f\left(\frac{x}{d_1}\right)$$

для насадки Борда и свободных прямоочных и закрученных струй [15] приведены на рис. 4.

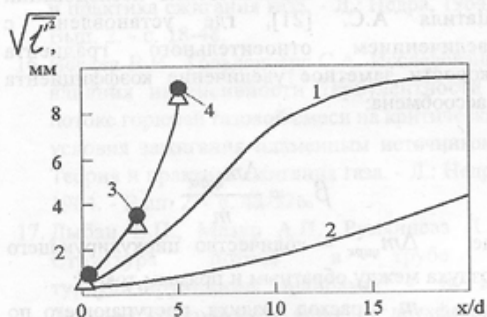


Рис. 4. Изменение осредненной по сечению длины пути смешения вдоль оси струи:

- 1 и 2 – закрученная и прямоочная свободная струя;
- 3 и 4 – прямоочная струя в канале с внезапным расширением при наличии и отсутствии внутренней насадки.

Как видно, показатель пути смещения, который характеризует способность потока к переносу количества движения и тепловой энергии с данного слоя в более отдаленный слой течения, в канале насадки Борда превышает соответствующий показатель \bar{l} , как в неограниченной $\left(\frac{d_2}{d_1} \rightarrow \infty\right)$ прямооточной, так и в закрученной струе.

Полученный вывод о высоких массообменных свойствах насадка с внезапным расширением также хорошо согласуется с данными известного исследования, выполненного Шориным С.Н. и Приселковым А.Б. [19], в котором впервые доказана перспективность практического использования прямооточных турбулизаторов в виде насадков с внезапным расширением. При этом установлено существенное уменьшение длины факела (в 2...3 раза) предварительно перемешанной смеси топлива и воздуха за счет дополнительной турбулизации потока в струйном смесителе и влияния размера рециркуляционной камеры на этот интегральный показатель интенсивности выгорания. С этими выводами коррелируются результаты исследований Института физической химии Польской Академии наук [20], где установлено существенное увеличение коэффициента теплоотдачи в теплообменной трубе с преградами.

В заключение следует отметить, что высокие массообменные свойства прямооточных элементов определяются не только высоким уровнем генерированной ими турбулентности, но и наличием градиентного (со сдвигом) течения. Это показано в аналитическом исследовании Шатиля А.С. [21], где установлено с увеличением относительного градиента скорости заметное увеличение коэффициента массообмена:

$$\beta_{об} = \frac{\Delta m_{цирк}}{m},$$

где $\Delta m_{цирк}$ – количество циркулирующего воздуха между обратным и прямым током;

m – расход воздуха, поступающего по прямооточу.

Относительный градиент скорости определяется из соотношения:

$$A_W = \left(\frac{dW}{dy}\right) \left(\frac{\Delta y}{W_2}\right) \approx \frac{\Delta W}{W_2}$$

где Δy – приращение продольной координаты;

W_2 – средняя скорость в выходном сечении канала.

Точно так же имеет место с увеличением параметра A_W рост относительного расхода воздуха в зону обратного тока –

$$k_{обр} = \frac{\Delta m_{обр}}{m},$$

где $\Delta m_{обр}$ – расход воздуха в эту зону.

Однако всегда выполняется условие $k_{обр} < \beta_{об}$, а разница между данными массообменными показателями определяет уровень эжекции струи, который также растет с ростом параметра A_W .

Выводы

Выполненные исследования показывают, что основной элемент трубчатой технологии сжигания топлив – насадка с внезапным расширением (контур П на рис.1) является надежным и эффективным источником интенсификации массообменных процессов при горении газовых топлив. Более высокая эффективность данной технологии по сравнению с известными вихревыми технологиями интенсификации горения и стабилизации пламени определяется следующими особенностями:

- пониженным аэродинамическим сопротивлением [5];
- возможностью реализации различных методов смесеобразования: предварительного (за счет локального или распределенного подвода топлива в канал минимального сечения насадки с внезапным расширением из топливного коллектора), диффузионного (за счет подачи топлива через торцевую стенку насадки) и комбинированного;
- возможностью минимизации токсичности продуктов сгорания;
- простотой конструкции и технологии изготовления;
- малой металлоемкостью и возможностью унификации конструктивных решений;
- универсальностью областей эффектив-

ного использования (от топок стехиометрических теплогенераторов и котлов [6] до камер сгорания ГТУ [7].

Последнее обстоятельство подтверждается выполненными в НТУУ "КПИ" исследованиями [5], которые показали, что трубчатый элемент может эффективно работать как в области избытков воздуха, близких к единице ($\alpha \rightarrow 1,0$), так и при высоких избытках воздуха ($\alpha = 2,0$ и более).

Выполненные обобщения аэродинамических характеристик типовых трубчатых элементов, а также установленные массообменные свойства потока за насадком с внезапным расширением (наряду с ранее выполненными исследованиями граничных и энерго-экологических характеристик при горении топлива в таком элементе [5-7, 9]) позволяют создать научно-обоснованную методику проектирования и расчета трубчатых топливосжигающих устройств различного назначения с предварительно заданными свойствами рабочего процесса.

Установленная в исследованиях адекватность характеристик одиночных трубчатых модулей и их систем позволяет упростить наладочные работы при промышленной реализации данной технологии и решить проблему тиражирования тепловой мощности горелок с учетом конкретных условий их использования.

Литература

- Halbouni A. Simulative und experimentelle Untersuchungsergebnisse zur Optimierung des COSTAIR-Brenners/ Teil 2: Experimentelle Vorgehensweise und Mesergebnisse// Gas-Warme International, juni, 1999, №6, - S. 354-361.
- Сорока Б.С. и др. Математическое моделирование горелочных устройств с пониженным выходом NO_x // Экотехнологии и ресурсосбережение, 2000, №1. - с. 69-73.
- Сорока Б.С., Пьяных К.Е. Развитие струй в сносящем потоке при сжигании топлива. Часть 1// Экотехнологии и ресурсосбережение, - 2001, №2. - с. 59-66.
- Bronneke C.B., Wiedmann U., Wulf G. NO_x - arme Feuerungssysteme für Kessel - anlagen// Gaswarme international - 48, 1999. - Heft 6. - s. 362-364.
- Любчик Г.Н., Микулин Г.А., Варламов Г.Б. и др. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей// Экотехнологические системы. - 2002. - Вып. 1, №2 (13). - с. 130-133.
- Микулин Г.С., Любчик Г.М., Варламов Г.Б. та ін. Використання трубчастих модулів як елементів інтенсифікації горіння, та підвищення енергоекологічної ефективності газових пальників// Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2003. - №4. - с. 58-65.
- Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Микулин Г.А., Левчук С.А. Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2003. - №2. - с. 65-74.
- Любчик Г.Н., Марченко Г.С. Газовый пальник// Патент України № 34812, м. п. кл. F23D 14/02, F23D 14/22, Бюл. № 2, 2001, - 5 с.
- Любчик Г.Н., Микулин Г.А., Марченко Г.С. и др. Особенности эмиссии NO_x и CO в горелках на базе трубчатых модулей // ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія. - 2001. - №4. - с. 59-63.
- Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975. - 326 с.
- Емцев Б.Т. Техническая гидродинамика. - М.: Машиностроение, 1978. - 462 с.
- Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 384 с.
- Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачев В.Я., Волынский М.С., Прудников А.Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. - м.: Машиностроение, 1964. - 525 с.
- Основы горения углеводородных топлив/ Первод с английского под ред. Л.Н. Хитрина и В.А. Попова. - М.: И.-Л., 1960. - 663 с.
- Ляховский Д. И. Турбулентность в прямоточных и закрученных струях // Теория и практика сжигания газа. - Л.: Недра, 1964. - Вып. 2. - с. 18-48.
- Иевлев В.И., Гольденберг С.А. Исследование влияния интенсивности турбулентности в потоке горючей газовой смеси на критические условия зажигания пламенным источником// Теория и практика сжигания газа. - Л.: Недра, 1964. - Вып. 2. - с. 48-57.
- Дыбан Е.П., Мазур А.И., Румянцева Л.А. Структура потока в трубе с турбулизирующими шайбами. - В кн. Тепломассоперенос в одно- и двухфазных средах. - К.: Наук. Думка, 1983. - С.3-10.
- Мазур А.И., Эпик Э.Я., Зиолковська И. и др. Интенсификация теплообмена и особенности структуры при течении в трубе с равномерно расположенными перфорированными перегородками// Пром. теплотехника. - 1985. - №2. - с. 9-13.

19. Ziolkowska I., Dolata M., Bohdanawicz K.// Wplyn promotora turbulencji w formie zestawu pregrad perforowanych w przestrzeni wewnatrzrurowej na efektywnosc wymieunika ciepła dla gasu.- Inz. Chem. i proc., 1982, 3, № 1.- S. 233-247.
20. Шорин С.Н., Приселков А.Б. Турбулентное и молекулярное смешение в струйных потоках // Теория и практика сжигания газа. - Л.: Недра, 1964. - Вып. 2. - С. 5-18.
21. Шатиль А.А. Топочные процессы и устройства (исследования и расчет).- С.-П.: АООТ НПО ЦКТИ, 1997.- 183 с.