



УДК 533.601:662.61

Бутовский Л. С.¹, Грановская Е. А.¹, Фиалко Н. М.^{1,2}, Строкин В. Н.³, Швецова Л. А.²¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». Украина, Киев²Институт технической теплофизики Украины. Украина, Киев³Центральный институт авиационного машиностроения. Россия, Москва**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФАКЕЛА ПРИ ПОДАЧЕ ГАЗА
В ЗОНУ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ЗА СТАБИЛИЗАТОРОМ****Анотація**

Наведено результати досліджень щодо стійкості горіння в умовах струменевої подачі газу в зону рециркуляції за стабілізатором при підвищених швидкостях палива.

Одержано дані стосовно впливу на характеристики сталості факелу режимних і конструктивних факторів, а також параметрів комбінованої подачі палива через центральні сопла у вихідному торці пілона та систему додаткових отворів у його бокових або торцевій стінках.

Abstract

The results of the investigation of improving of the flame stability in condition of the high velocity of gas supply in the recirculation zone behind a stabilizer are shown.

The data about the influence on flame stability of characteristics of operational and constructive factors and also of parameters of combined fuel feed when the main part of gas is supplied through the special nozzles in the center of the stabilizer end face and the other part of fuel — through additional orifices in the stabilizer end face or on its side-walls with a smaller velocity are received.

Постановка проблеми

Обеспечение устойчивого горения топлива при изменении параметров рабочего процесса является одним из основных требований, предъявляемым к

горелочным устройствам, которые используются в промышленных и энергетических установках. В свою очередь диапазон возможных режимов работы и, соответственно, применимости конкретного типа горелочного устройства определяется используемым методом организации процессов смесеобразования и стабилизации факела.

В топливосжигающих устройствах объектов энергетики и промышленности (камерах сгорания газотурбинных и парогазовых установок, топках котлов, сушилах и др.) широко применяются горелочные устройства стабилизаторного типа [1–3]. Среди таких устройств выделяются горелки с подачей топлива в зону рециркуляции за стабилизатором. Они показали высокую эффективность в широком диапазоне устойчивой работы при коэффициентах избытка воздуха значительно больше единицы. Однако в целом ряде случаев необходимо обеспечить устойчивую работу горелочного устройства также и при значениях коэффициента избытка воздуха, близких к единице.

Таким образом, потребность обеспечения работы горелочных устройств стабилизаторного типа при подаче топлива в зону рециркуляции в условиях изменения коэффициента избытка воздуха в широком диапазоне от $\alpha \gg 1,0$ до $\alpha \approx 1,0$ обусловило необходимость проведения комплекса соответствующих экспериментальных исследований.

Анализ состояния исследований

Основные положения полуэмпирических теорий и большинство результатов эксперименталь-

ных исследований устойчивости факела в стабилизаторной системе на бедном и богатом пределах касаются условий сжигания гомогенных предварительно перемешанных смесей топлива и воздуха [4–7] или смесей с некоторой степенью неоднородности [8].

Характеристики стабилизаторных горелочных устройств с подачей топлива в зону рециркуляции относительно зажигания факела и устойчивости по бедному срыву, а также результаты о влиянии на эти характеристики режимных и конструктивных факторов приведены в [9, 10]. В данных работах показано, что характеристики факела при зажигании и бедном срыве в случае горения предварительно перемешанных смесей и подачи топлива в зону рециркуляции определяются, в основном, одними и теми же факторами — скоростью потока W_v , температурой воздуха t_v , шириной стабилизатора $B_{ст}$, коэффициентом загромождения $k_f = B_{ст}/t_{ст}$, (где $t_{ст}$ — шаг стабилизаторов), а также характеристиками зоны рециркуляции. При этом установлено, что в условиях подачи топлива в зону рециркуляции на режимах бедного срыва и зажигания факела относительная скорость подачи газа невысока и практически не влияет на аэродинамическую структуру зоны обратных токов [11].

Как следует из анализа литературных источников, экспериментальные исследования при различных скоростях и расходах вещества, вдуваемого в след за стабилизатором, проводились, главным образом, для изотермических условий (см., например, [12]). В рамках такого подхода, в частности, показано, что характеристики следа за плохообтекаемым телом можно изменить, меняя степень разрежения в закормовой области следа, например, отсасывая или вдувая в него определенное количество вещества (газа) [5]. В первом случае в связи с увеличением разрежения возрастает поперечный и продольный градиенты статических давлений за кормой тела, вследствие чего струйки тока при срыве со стабилизатора сильнее отклоняются к оси следа и длина зоны обратных токов уменьшается. Во втором случае, напротив, градиенты давления понижаются, и длина зоны обратных токов увеличивается.

Ряд экспериментов по вдуву газа (гелий, азот) в след за конусом через различное количество отверстий разного диаметра и при их разном расположении в условиях сверхзвукового течения воздуха выполнены А. Б. Бауэром [13]. При этом установлено, что зона обратных токов исчезает для относительных массовых расходов вдуваемого вещества

$$\frac{G_{пр} \cdot 100\%}{\rho_v \cdot W_k \cdot F_{кон}} > 3,6\%,$$

где $G_{пр}$ — расход вдуваемого вещества, ρ_v — плотность воздуха набегающего потока, W_k — скорость

воздуха на срезе стабилизатора, $F_{кон}$ — площадь выходной плоскости конуса.

Результаты исследований аэродинамических характеристик следа за телом, обтекаемым кольцевой струей при вдуве воздуха через центральное отверстие в теле приведены в работе [14]. Показано, что, начиная со значений относительной скорости центральной струи

$$\lambda = \frac{W_{цс}}{W_{кк}} > 0,425$$

($W_{кк}$, $W_{цс}$ — скорости кольцевой и центральной струи соответственно) происходит нарушение структуры зоны обратных токов и уменьшение ее размеров. В случае сравнительно больших величин λ ($\lambda = 8,55$) нарушается регулярность вихреобразования, и след за телом оказывается заполненным веществом центральной струи при наличии небольшой кольцевой зоны вихреобразования вблизи кромок тела.

Рассмотренные выше работы являются типичным примером исследований, в которых установлены общие закономерности влияния струйной подачи газа на структуру течения в зоне рециркуляции за плохообтекаемыми телами в изотермических условиях. В опубликованной литературе практически отсутствуют данные о картине течения в указанной зоне в условиях сжигания газа при его струйной подаче в след за стабилизатором. Настоящая работа призвана восполнить этот пробел.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

В данной работе рассмотрены вопросы аэродинамики и массообмена при струйной подаче природного газа в зону рециркуляции за стабилизатором в случае высоких скоростей истечения газа применительно к изотермическому потоку и в условиях горения. Определенное внимание в работе было также уделено анализу возможностей повышения устойчивости горения при нарушении вихреобразования в зоне обратных токов.

Изложение основного материала исследований

Рис. 1, 2 иллюстрируют характерные результаты выполненных экспериментальных исследований аэродинамики и массообмена при струйной подаче газа в ближний след за стабилизатором. На рис. 1, б представлено изменение донного давления $\Delta P_{ст}$ на торцевой стенке плоского стабилизатора шириной $B_{ст} = 15 \times 10^{-3}$ м в зависимости от параметра $G_r \cdot W_r$ для изотермических условий ($\Delta P_{ст} = P_{ст} - P_{кам}$; $P_{ст}$, $P_{кам}$ — донное давление на торцевой стенке стабилизатора и на стенке рабочего участка, Па; G_r — массовый

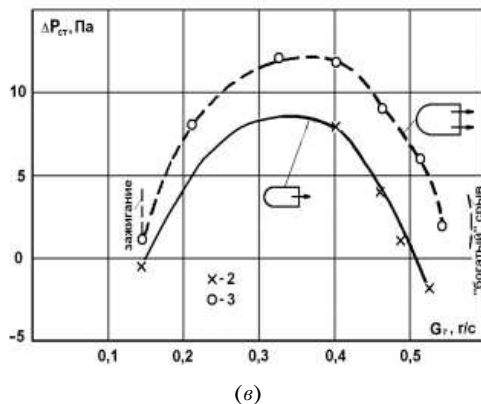
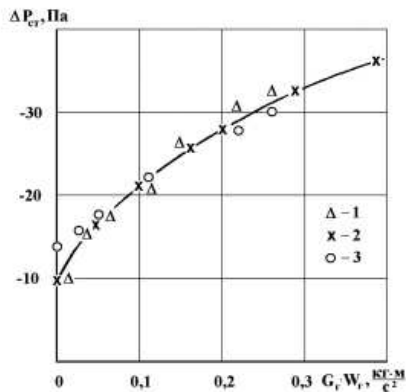
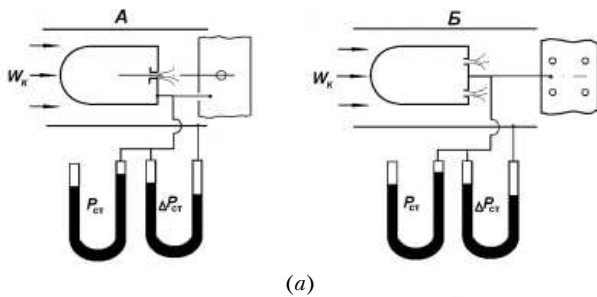


Рис. 1. Схема измерения донного давления при подаче газа в зону рециркуляции за стабилизатором (а) и зависимость перепада донного давления $\Delta P_{ст}$ от комплекса $G_{г} \cdot W_{г}$ в изотермических условиях (б) и от расхода газа $G_{г}$ при горении (в) для $B_{ст} = 15 \times 10^{-3}$ м; $k_f = 0,085$; $W_{к} = 20,0$ м/с в условиях одноструйной (точки 1, 2) и многоструйной (точки 3) подачи газа: 1 – $d_r = 2 \times 10^{-3}$ м; 2 – 6×10^{-3} м; 3 – 3×10^{-3} м

расход газа, кг/с; $W_{г}$ – скорость истечения газа из отверстия, м/с). Приведенные на рисунке данные отвечают подаче газа через одно отверстие $d_r = 2,0 \times 10^{-3}$ м и $6,0 \times 10^{-3}$ м и систему из четырех отверстий $d_r = 3,0 \times 10^{-3}$ м, расположенных с относительным шагом $\bar{l}_r = t_r/d_r = 80$ (см. рис. 1, а). Как видно из рис. 1, б, с увеличением параметра $G_{г} \cdot W_{г}$ при всех вариантах подачи газа донное давление уменьшается, то есть степень разрежения в закормовой области стабилизатора возрастает, что свидетельствует об эжектирующем действии газовой струи. На рис. 1, в представлены соответствующие данные относи-

тельно донного давления в условиях горения газа. Согласно результатам натуральных экспериментов с момента воспламенения факела донное давление оказывается более высоким, чем в случае изотермического течения. При этом зависимость $\Delta P_{ст} = f(G_{г})$ имеет экстремальный характер. Восходящая ветвь кривой соответствует относительно небольшим расходам газа, когда протяженность факела сопоставима с длиной зоны рециркуляции. На этих режимах увеличение расхода газа, как очевидно, приводит к росту тепловыделения и, соответственно, к повышению давления в зоне рециркуляции. В данных условиях в пределах зоны обратных токов происходит интенсивное смесеобразование топлива и окислителя, так что механизм горения по ряду соответствующих характеристик приближается к диффузионному. Что касается нисходящей ветви зависимости $\Delta P_{ст} = f(G_{г})$, отвечающей большим значениям расхода газа, то в этих условиях наблюдается увеличение дальности газовой струи с ростом $G_{г}$, то есть струи как бы пробивают зону рециркуляции, и значительная часть топлива выносится за пределы этой зоны, где и происходит в основном интенсивное горение газа.

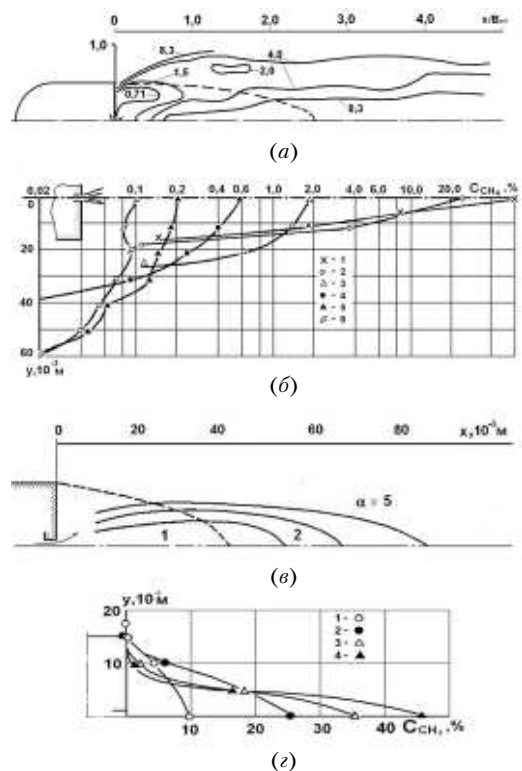


Рис. 2. Поля коэффициента избытка воздуха (а), (в) и концентраций топлива (б), (г) в следе за стабилизатором по оси газового отверстия в изотермических условиях для $B_{ст} = 30 \times 10^{-3}$ м; $k_f = 0,107$; $W_{к} = 20,2$ м/с: а – $d_r = 2,0 \times 10^{-3}$ м; $t_r/d_r = 1,5$; $W_{г}/W_{в} = 0,14$; б, в – $d_r = 3,2 \times 10^{-3}$ м; $t_r/d_r = 10$; $W_{г}/W_{в} = 1,56$; 1 – $x = 15 \times 10^{-3}$ м; 2 – 40×10^{-3} м; 3 – 90×10^{-3} м; 4 – 190×10^{-3} м; 5 – 380×10^{-3} м; 6 – 750×10^{-3} м; г – $d_r = 3,2 \times 10^{-3}$ м; $t_r/d_r = 10$; $x/B_{ст} = 1,33$; 1 – $W_{г}/W_{в} = 1,14$; 2 – 2,28; 3 – 3,22; 4 – 4,52

Данное обстоятельство наряду с эжектирующим действием газовых струй обуславливает падение донного давления с увеличением расхода газа.

На рис. 2, а показаны поля коэффициента избытка воздуха в ближнем следе за стабилизатором для изотермических условий при подаче газа через систему отверстий, расположенных вдоль осевой линии стабилизатора

$$(d_r = 2,0 \times 10^{-3} \text{ м}, \frac{t_r}{d_r} = 1,5).$$

Приведенные данные отвечают ситуации, когда отношение скорости газа W_r к скорости воздуха W_b сравнительно невелико ($W_r/W_b = 0,14$), то есть имеет место значительное превышение скорости потока воздуха на срезе стабилизатора над скоростью газа.

Результаты исследований, представленные на рис. 2, б, в, свидетельствуют о том, что при увеличении относительной скорости газа ($W_r/W_b = 1,56$) положение максимума концентрации метана отвечает оси струи. При этом в зоне рециркуляции ($l_{\text{зот}} \approx 3,9 B_{\text{ст}}$) концентрация метана находится в пределах воспламенения. Как видно из рис. 2, г, с ростом относительной скорости газа ($W_r/W_b > 2,3$) вблизи срывных кромок стабилизатора появляются зоны с избыточным содержанием воздуха, который не участвует в процессе горения.

На основе результатов проделанных в работе исследований и имеющихся в литературе данных [9, 11, 15] об аэродинамике и массообменных характеристиках следа за стабилизатором при струйной подаче газа в зону рециркуляции схему течения и массопереноса в зоне обратных токов можно представить следующим образом (рис. 3).

Топливо, выходящее из отверстия с температурой t_r , взаимодействует с раскаленными газами обратного течения с расходом, который равен $G_{\text{рец}}$. Часть обратного тока, равную $k \cdot G_{\text{рец}}$ (где $k < 1,0$), можно считать постоянно циркулирующей в зоне. В результате такого взаимодействия двух встречных потоков на границе газовой струи образуется дополнительная зона рециркуляции, в которой происходит интенсивное перемешивание топлива с раскаленными продуктами сгорания, нагрев топлива и его воспламенение. Последнее возможно при выполнении следующих условий в рамках указанной дополнительной зоны рециркуляции. Во-первых, необходимо, чтобы здесь имел место стехиометрический состав смеси, во-вторых, скорость потока не должна превышать скорость турбулентного распространения пламени и, наконец, время контакта раскаленных продуктов горения с образовавшейся горючей смесью должно быть достаточным для нагрева этой смеси до температуры воспламенения.

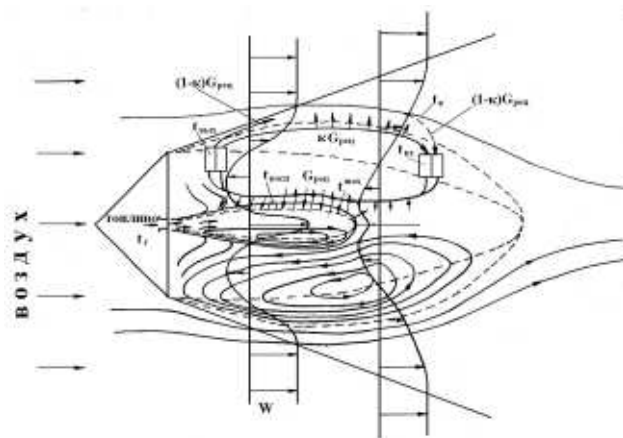


Рис. 3. Схема течения и массообмена в следе за стабилизатором при струйной подаче газа в зону рециркуляции

Часть вещества обратного тока $(1-k) \cdot G_{\text{рец}}$ после прохождения основной зоны рециркуляции выносятся вихрями на периферию этой циркуляционной зоны в воздушный поток с температурой $t_{\text{вых}}$ и отдает тепло турбулентной диффузией набегающему потоку воздуха. Ушедшие из зоны рециркуляции продукты сгорания замещаются таким же количеством $(1-k) \cdot G_{\text{рец}}$ свежего воздуха, поступающего из пограничного слоя в хвостовом участке зоны. В этом слое воздух нагревается от температуры t_b до температуры на входе в зону рециркуляции $t^{\text{вх}}$. Затем оба потока (циркулирующих продуктов сгорания и свежего воздуха) соединяются, и далее смесь нагревается по мере движения в зоне рециркуляции до $t^{\text{макс}}$ за счет массообмена с раскаленными продуктами реакции. На участке, где температура смеси изменяется от $t^{\text{восп}}$ до $t^{\text{вых}}$, происходит химическая реакция горения топлива с выделением тепла.

Описанная картина вихреобразования и тепло-массообмена обуславливает тот факт, что зона воспламенения ($\alpha \approx 1,0$) не имеет четких границ и представляет собой слой достаточно сложной конфигурации, расположенный в области смешения струи обратного тока основной зоны циркуляции.

Рассмотрим далее результаты исследований, касающиеся изучения условий стабилизации факела при высоких скоростях истечения газовых струй в зону рециркуляции. Эксперименты, проведенные в ходе испытаний систем стабилизаторов, показали, что при уменьшении коэффициента избытка воздуха α (увеличении расхода топлива), начиная с его определенного значения, наблюдается отрыв факела от стабилизатора, затем расстояние между кромкой факела и торцевой стенкой стабилизатора увеличивается и, наконец, стабилизация факела нарушается и пламя срывается. Картина отрыва факела в рассматриваемых условиях имеет сходство со срывом диффузионного факела, развивающегося в затопленном пространстве. При этом, если скорость газа, при которой происходит срыв диффузионного факела, за-

висит только от диаметра газового сопла, то при сжигании газа за стабилизатором, обтекаемым воздушным потоком, срывная скорость, как показали проведенные эксперименты, является функцией нескольких параметров. Характерные результаты исследований по устойчивости горения в системе стабилизаторов представлены на рис. 4. Согласно полученным данным устойчивость факела улучшается (значение α_{\min}^I уменьшается) с увеличением ширины стабилизатора $B_{\text{ст}}$ (рис. 4, а), коэффициента загромождения k_f и температуры воздуха t_b (рис. 4, б) и ухудшается с ростом скорости воздушного потока W_k (рис. 4, а). Что касается влияния на величину α_{\min}^I суммарной площади газовых отверстий, то для фиксированной площади торцевой поверхности стабилизатора $F_{\text{ст}}$ с увеличением площади Σf_r (то есть с уменьшением отношения $F_{\text{ст}}/\Sigma f_r$) коэффициент избытка воздуха на «богатом» пределе уменьшается (рис. 4, в). Данная закономерность наблюдается до значений $F_{\text{ст}}/\Sigma f_r \approx 40$, когда горение осуществляется в виде отдельных микрофакелов.

При дальнейшем увеличении Σf_r и, соответственно уменьшении отношения $F_{\text{ст}}/\Sigma f_r$, значение α_{\min}^I не зависит от суммарной площади газоподающих отверстий. Это связано со слиянием отдельных микрофакелов в единый факел, неустойчиво горящий на некотором расстоянии от стабилизатора в результате заполнения части зоны рециркуляции холодным газом.

Зависимость величины α_{\min}^I , определяющей устойчивость факела на «богатом» пределе, от конструктивных и режимных факторов имеет вид:

$$\alpha_{\min}^I = 1,44 \frac{W_k^{0,3} e^{1,5k_f}}{B_{\text{ст}}^{0,5} k_f^{1,5}} \left(\frac{T_b}{273} \right)^{-0,6} \left(4,08 \cdot 10^{-3} \frac{F_{\text{ст}}}{\Sigma f_r} + 0,84 \right)$$

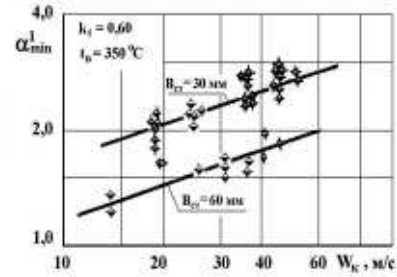
при $F_{\text{ст}}/\Sigma f_r > 40$ и

$$\alpha_{\min}^I = 1,44 \frac{W_k^{0,3} e^{1,5k_f}}{B_{\text{ст}}^{0,5} k_f^{1,5}} \left(\frac{T_b}{273} \right)^{-0,6}$$

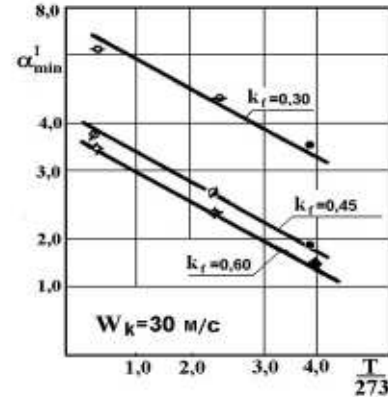
при $F_{\text{ст}}/\Sigma f_r < 40$.

Таким образом, из приведенных данных следует, что улучшить устойчивость факела на «богатом» пределе при подаче газа в зону рециркуляции при заданных режимных условиях (W_k, t_b) можно путем увеличения ширины стабилизатора $B_{\text{ст}}$, коэффициента загромождения k_f и суммарной площади газоподающих отверстий Σf_r до $F_{\text{ст}}/\Sigma f_r \approx 40$. При этом согласно полученным результатам (рис. 4) в исследованном диапазоне изменения режимных и конструктивных факторов коэффициент избытка воздуха при «богатом» срыве $\alpha_{\min}^I > 1,0$.

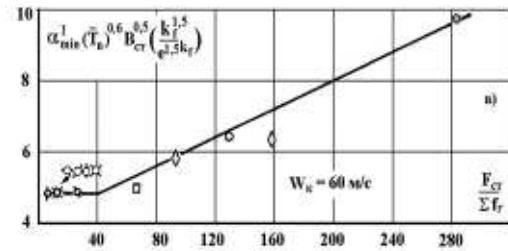
Из анализа характеристик течения и смесеобразования в зоне обратных токов при струйной дискретной подаче газа в зону рециркуляции можно сде-



(а)



(б)



(в)

Рис. 4. Влияние на «богатый» срыв факела:
 а – скорости воздушного потока в камере W_k при различной ширине стабилизатора $B_{\text{ст}}$;
 б – относительной температуры воздуха $t_b/273$ при различных значениях коэффициента загромождения k_f ;
 в – относительной площади газоподающих отверстий $F_{\text{ст}}/\Sigma f_r$.

лать вывод о том, что в рассмотренных условиях при больших скоростях истечения газа так называемый «богатый» срыв факела в подобласти зоны рециркуляции, непосредственно прилегающей к торцевой стенке стабилизатора, имеет на самом деле черты бедного срыва пламени. Действительно в этой подобласти, как и в случае бедного срыва, наблюдается недостаток топлива и, соответственно избыток воздуха ввиду того, что струя газа как бы пробивает зону рециркуляции, вынося основную массу топлива за ее пределы.

С учетом описанного механизма «богатого» срыва при высоких скоростях истечения газа были предложены новые технические решения, направленные

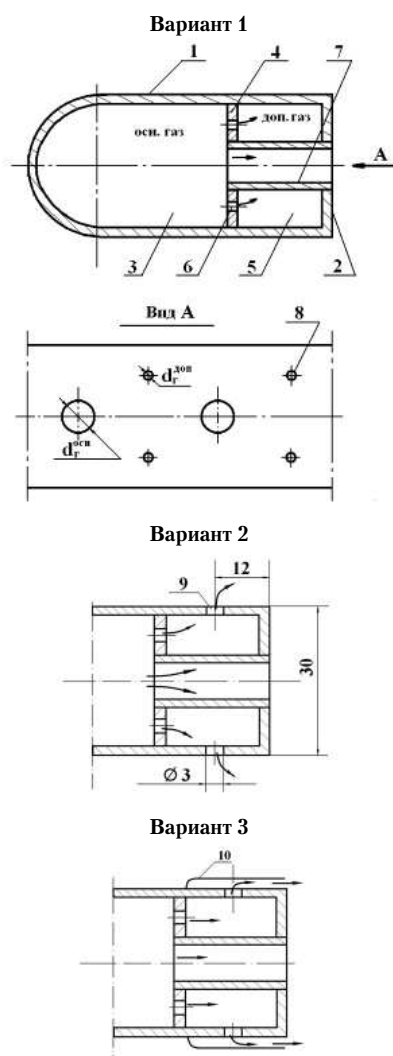


Рис. 5. Схемы подачи дополнительного газа при подводе основного топлива в след за стабилизатором:
вариант 1 – подача дополнительного газа из торцевой поверхности стабилизатора: (1 – корпус стабилизатора; 2 – торцевая стенка; 3 – камера подвода основного газа; 4 – перегородка; 5 – камера подачи дополнительного газа; 6 – дросселирующие отверстия; 7 – сопло подачи основного газа; 8 – отверстия подачи дополнительного газа);
вариант 2 – подача дополнительного газа внедрением в набегающий поток воздуха (9 – отверстия подачи дополнительного газа);
вариант 3 – подача дополнительного газа в пристенный слой (10 – дефлекторы)

на повышение стабильности горения. Суть этих решений заключается в обеспечении высокотемпературного поджога корня факела основного топлива с помощью дополнительных факелов, которые образуются путем подачи газа в зоны с избыточным содержанием воздуха в непосредственной близости к стабилизатору со скоростью, значительно меньшей скорости основного газа. В работе выполнены исследования по установлению зависимости характеристик богатого срыва от диаметра сопла подачи основного газа, а также диаметра и относительного шага расположения отверстий подачи дополнительного газа. Схемы исследованных вариантов комбинированной газораздачи показаны на рис. 5.

Как видно из схемы по варианту 1, в полем стабилизаторе (1) предусмотрены две отдельные камеры для подвода основного (3) и дополнительного (5) газа, разделенные перегородкой (4). Основное топливо при определенном давлении из камеры (3) через сопла (7) со скоростью, определяемой перепадом давления между камерой (3) и зоной обратных токов, подается в след за стабилизатором. В перегородке (4) выполнены отверстия (6) для подачи газа в камеру дополнительного газа (5). Затем этот газ через отверстия (8) в торцевой стенке стабилизатора также подается в след за стабилизатором. Суммарная площадь отверстий (8) больше площади дросселирующих отверстий (6), благодаря чему, как очевидно, скорость выхода газа из отверстий (8) меньше, чем из отверстий (6). Скорость выхода и расход дополнительного газа из отверстий (8) можно регулировать, меняя соотношение площадей отверстий (6) и (8). В соответствии со схемой варианта 2 дополнительный газ через систему отверстий (9) в боковых стенках стабилизатора подается внедрением в пристенный слой воздуха, обтекающего стабилизатор. По схеме варианта 3 дополнительный газ выходит из отверстий в боковых стенках стабилизатора и с помощью дефлекторов (10) направляется в пристенный слой спутно воздушному потоку.

Характерные результаты испытаний для указанных схем подачи газа приведены на рис. 6. Как видно из рис. 6, а, зависимости срывных характеристик факела основного топлива на богатом пределе ($G_{\text{осн}}^{\text{max}}$) от расхода дополнительного газа $G_{\text{р}}^{\text{доп}}$ имеют достаточно ярко выраженный максимум. Вначале с ростом расхода дополнительного газа значение срывного расхода основного газа возрастает, что связано с увеличением тепловыделения дополнительного топлива вблизи корневой зоны основного факела. При достижении определенного расхода дополнительного газа длина его факелов постепенно увеличивается, и зона рециркуляции заполняется холодным топливом основного и дополнительного газа с соответствующим ухудшением устойчивости общего факела. При этом также происходит слияние основного и дополнительных факелов, интенсивность массообмена в корне которых постепенно снижается, а длина общего факела существенно возрастает. Из данных, приведенных на рис. 6, а, также следует, что максимальные срывные скорости факела основного топлива обеспечиваются при реализации третьего варианта схемы подачи дополнительного газа. В данном случае подача дополнительного газа позволяет примерно в 2,5...3 раза увеличить максимальный срывной расход основного газа. При этом расход дополнительного газа, при котором достигается максимальная устойчивость горения основного факела, составляет $G_{\text{р}}^{\text{доп}} = (0,2...0,3) G_{\text{осн}}^{\text{осн}}$. В исследуемом диапазоне скоростей данные режимы отвечают минимальным значениям коэффициента избытка воздуха в зоне горения $\alpha \sim W_{\text{к}} \cdot B_{\text{ст}} / (G_{\text{осн}}^{\text{осн}})^{\text{max}}$ (рис. 6, б).



Важно также подчеркнуть, что в соответствии с полученными данными для обеспечения высокой устойчивости основного факела должно выполняться условие, согласно которому скорость выхода газа из дополнительных отверстий $W_{\Gamma}^{\text{доп}}$ не должна превышать скорости воздушного потока W_k на срезе стабилизатора.

Выводы

Проведенные исследования устойчивости факела за стабилизатором при подаче газа в зону рециркуляции системой дискретных струй в условиях высоких скоростей истечения газа показали следующее:

1. Происходящий в рассматриваемых условиях «богатый» срыв факела за стабилизатором имеет некоторые общие черты со срывом диффузионного факела, т. е. обладает определенными свойствами «бедного» срыва. Это связано с уменьшением концентрации топлива в зоне рециркуляции в корне факела и выносом основной массы топлива за ее пределы.

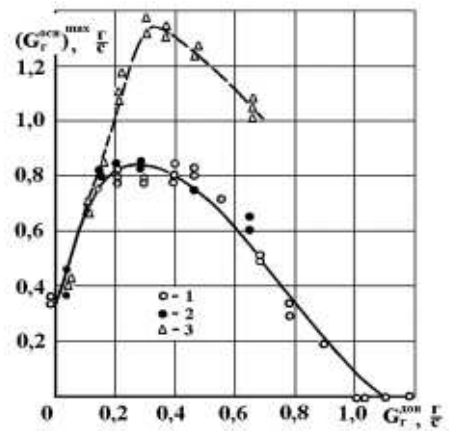
2. Устойчивость горения факела может быть повышена путем увеличения ширины стабилизатора, коэффициента загромождения проходного сечения канала, а также суммарной площади газоподающих отверстий при выполнении условия $F_{\text{ст}}/\Sigma f_{\Gamma} > 40$.

3. Существенное повышение устойчивости факела достигается посредством использования различных схем дополнительной подачи газа в зону рециркуляции с целью организации дежурных факелов, поджигающих корень основного факела.

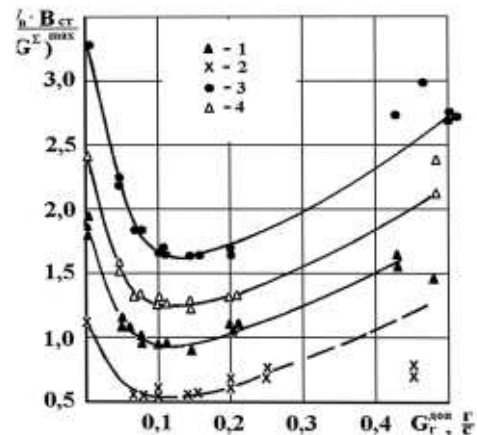
4. Максимальные срывные скорости факела основного топлива обеспечиваются при применении схемы подачи дополнительного газа спутно воздушному потоку вблизи срывных кромок стабилизатора.

Литература

1. Христин В. А., Варламов Г. Б. Газотурбинные установки: история и перспективы. — К.: Політехніка, 2006. — 250 с.
2. Варнатиц Ю., Маас У., Дибл Д. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М.: Физматлит, 2003. — 352 с.
3. Тумановский А. Г., Гутник М. Н., Васильев В. Д. и др. Проблемы и пути создания малотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ // Теплоэнергетика. — 2006, № 7. — С. 22–29.
4. Ильяшенко С. М., Талантов А. В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. — М.: Машиностроение, 1964. — 306 с.
5. Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1961. — 526 с.



(a)



(б)

Рис. 6. Характеристики устойчивости факела при комбинированной подаче топлива в след за стабилизатором в зависимости от расходов дополнительного ($G_{\Gamma}^{\text{доп}}$) газа при разных схемах его подачи (а) и скоростях набегающего потока (б) для $B_{\text{ст}} = 30 \times 10^{-3}$ м; $k_f = 0,107$; $W_k = 20,2$ м/с; $d_{\Gamma}^{\text{осн}} = 3,2 \times 10^{-3}$ м; $d_{\Gamma}^{\text{доп}} = 4 \times 3,2 \times 10^{-3}$ м; а) 1, 2, 3 — номера вариантов схем подачи дополнительного воздуха (рис. 5); б) подача дополнительного газа по схеме варианта 1: 1 — $W_k = 18,3$ м/с; 2 — 23,5 м/с; 3 — 34,4 м/с; 4 — 46,1 м/с

6. Щетинков Е. С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965. — 739 с.

7. Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей / Под ред. У. Р. Хауторна и У. Г. Олсона. — М.: Машиностроение, 1964. — 648 с.

8. Лебедев Б. Л., Доктор И. Ю. О стабилизации неоднородных смесей // Горение и взрыв. — М.: Наука, 1972. — С. 363–364.

9. Бутовский Л. С., Грановская Е. А., Любчик Г. Н., Христин В. А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени // В кн.: Теория и практика сжигания газа. Вып. VI — Л.: Недра, 1975. — С. 324–338.

10. Kremer H., Minx E., Rawe R. Flammenstabilität bei Gasbrenner mit Geblase // Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, № 2567. Fachgruppe Energie. Westdeutscher Verlag, 1976. — 122 s.

11. *Бутовский Л. С., Христич В. А.* Структура зоны смещения и особенности выгорания газа за стабилизатором пламени // В кн.: Теория и практика сжигания газа. — Л.: Недра, 1972. — С. 76–82.

12. *Швец А. И., Швец И. Т.* Газодинамика ближнего следа. — К.: Наукова думка, 1976. — 382 с.

13. *Бауэр А. Б.* Эксперименты по вдуву в ближний след // Ракетная техника и космонавтика. — 1968, № 8. — С. 70–75.

14. *Хигир, Бэр.* Область течения двойных концентрических струй вблизи сопла // Теоретические основы инженерных расчетов. Серия Д. — 1964. — т. 86, № 4. — С. 195–204.

15. *Бутовский Л. С.* Влияние коэффициента загромождения на течение в зоне отрыва за стабилизаторной решеткой // В кн.: Вестник Киевского политехнического института, сер. Теплоэнергетика. — 1972, № 99. — С. 60–64.