



УДК 533.601:662.61

Бутовский Л.С.<sup>1</sup>, Грановская Е.А.<sup>1</sup>, Фиалко Н.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».  
Украина, г. Киев

<sup>2</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины. Украина, г. Киев

## УСТОЙЧИВОСТЬ ФАКЕЛА ЗА ПЛОСКИМ СТАБИЛИЗАТОРОМ ПРИ ПОДАЧЕ ГАЗА ВНЕДРЕНИЕМ В ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

### Анотація

*Наведено результати досліджень стійкості горіння за плоскими стабілізаторами у разі подачі газу прониканням у повітряний потік крізь систему отворів. Одержано дані щодо впливу на характеристики стабілізації полум'я у пальникових пристроях швидкості і температури повітря, ширини та взаємного розташування стабілізаторів, розміщення газових отворів та ін.*

### Abstract

*The results of the investigation of the flame stability behind a stabilizer when natural gas is supplied into the air flow through a system of gas holes. The data about the influence on characteristics of flow stabilization of the air velocity and temperature, the width and interference of stabilizers, a gas holes location etc. are received.*

### Постановка проблемы

Проблема обеспечения высокой надежности топливоиспользующих энергетических установок является одной из основных как при модернизации существующего, реабилитации действующего, так и при создании нового энергетического оборудования — камер сгорания газотурбинных и парогазовых установок, топок энергетических котлов, теплогенераторов широкого промышленного назначения, сушил и пр. [1, 2]. Характеристики таких энергетических установок во многом определяют

ся технологиями сжигания топлив, реализующимися в соответствующих горелочных устройствах. Одним из важнейших требований, предъявляемым к таким устройствам является требование их устойчивой работы в широком диапазоне режимных параметров.

Устойчивость работы горелочных устройств в плане стабилизации пламени, как известно, достигается в большинстве случаев с помощью различных аэродинамических методов. При этом посредством разных технических устройств (плохообтекаемых тел, завихрителей, внезапных расширений и т.д.) формируются так называемые зоны обратных токов, призванные обеспечивать непрерывное воспламенение топлива.

В последний период все более широкое распространение находят горелочные устройства, в которых для стабилизации пламени используются плохо обтекаемые тела. При этом особый интерес представляют устройства на основе системы плохообтекаемых тел — стабилизаторов, в которых подача газа осуществляется внедрением в набегающий воздушный поток через ряд отверстий в боковых стенках стабилизатора [3, 4]. В таких устройствах может быть реализовано высокоэффективное смесеобразование топлива с окислителем за счет предварительного рационального распределения этого топлива в потоке окислителя. Характеризуя горелочные устройства данного типа в целом, следует отметить такие их преимущества, как широкий диапазон регулирования по мощности, коэффициенту избытка окислителя, скоростям компонентов, низкий уровень потерь давления, тех-

нологичность и простота изготовления, модульность и пр.

Потребности конструирования новых и дальнейшее совершенствование существующих горелочных устройств рассматриваемого класса обуславливают необходимость проведения углубленных экспериментальных исследований по определению диапазонов их устойчивой работы.

### Анализ состояния исследований

Анализ основных положений теории и практики стабилизации пламени плохообтекаемыми телами выполнен в ряде работ [5–8 и др.]. Исследования обтекания тел вязкими потоками показывают, что в следе за стабилизатором возникает зона пониженного давления с продольным и поперечным градиентами. В результате наличия поперечного градиента статических давлений струйки тока, которые обтекают стабилизатор, отклоняются к оси следа. С другой стороны, под действием продольного градиента статических давлений возникает течение, направленное вдоль оси следа в сторону стабилизатора. При этом в пограничном слое в закормовой области тела возникают вихри, закручивающиеся к оси следа, и таким образом, формируется необходимая для стабилизации пламени зона циркуляции (см. рис. 1). В рамках этой зоны выделяется зона обратных токов, которая ограничивается поверхностью нулевых скоростей потока (1). Причем между данной зоной и пограничным слоем осуществляется непрерывный обмен массы газа [8].

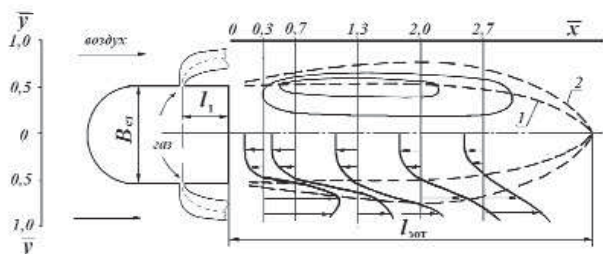


Рис. 1. Схема течения в зоне циркуляции за плоским стабилизатором пламени:

1, 2 – границы зоны обратных токов и зоны циркуляции соответственно

Что касается общих условий стабилизации пламени, то они связаны с выполнением следующих требований:

а) топливо-воздушная смесь находится в концентрационных пределах воспламенения данного топлива;

б) в зоне горения имеет место подобласть, в которой скорость потока меньше скорости распространения пламени;

в) мощность источника поджигания достаточна для сообщения топливу необходимой энергии активации.

Следует подчеркнуть, что срыв факела происходит при нарушении хотя бы одного из этих условий.

В связи со сложностью процессов горения общий теоретический подход к проблеме стабилизации пламени до настоящего времени не разработан. Ввиду этого при рассмотрении вопросов, касающихся стабилизации пламени, используются различные полуэмпирические теории, базирующиеся на соответствующих упрощенных модельных представлениях. Причем в большинстве теорий рассматривается горение гомогенных смесей.

По одной из таких теорий зона обратных токов рассматривается как объемный изотермический реактор с однородным химическим составом и с высокой интенсивностью перемешивания реагентов (реактор Лонгвелла). Тепло из этого реактора передается свежей смеси, подогревая и воспламеняя ее. Условие срыва пламени в данном случае имеет вид:

$$\frac{W_{cp}}{B_{ст} \cdot P \cdot Z \cdot T \cdot f(\alpha)} = \frac{B}{R_{см}} \approx const, \quad (1)$$

где  $W_{cp}$  – скорость потока перед срывом факела;  $P$  – давление смеси;  $T$  – температура смеси;  $R_{см}$  – газовая постоянная смеси;  $B$  – расчетный коэффициент;  $Z$  – постоянная величина;  $f(\alpha)$  – некоторая функция коэффициента избытка воздуха.

Таким образом, согласно данной теории стабилизации границы устойчивого горения определяются скоростью потока, размером стабилизатора, давлением и температурой смеси, а также коэффициентом избытка воздуха.

Обработка опытных данных для стабилизаторов различной конфигурации с использованием зависимости (1) показала принципиальную возможность обобщения полученных результатов на основе положений указанной теории стабилизации пламени. Однако, количественные расхождения по величине параметра  $B$ , определенного теоретически и на базе экспериментальных данных, оказались весьма существенными (примерно в два раза). Это, очевидно, не позволяет производить количественные оценки характеристик устойчивости пламени за стабилизатором с использованием выражения (1).

Согласно другой теории [7] зона обратных токов за стабилизатором рассматривается как тело, нагретое до определенной температуры, которое передает свое тепло свежей смеси. При этом условие срыва пламени определяется соотношением:

$$\frac{B_{см} W_{cp}}{\nu} = A \left( \frac{B_{см} U_n}{a} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости смеси;  $U_n$  – нормальная скорость распространения пламени;  $a$  – коэффициент температуропроводности смеси.

По третьей теории указанное условие срыва определяется соотношением между временем пребывания продуктов сгорания в зоне реакции  $t_z$  и временем  $t_p$  турбулентного сгорания.

На срывных пределах отношение этих величин должно иметь постоянное значение:

$$\frac{t_z}{t_p} \sim \frac{B_{CT} \cdot U_H^2}{a \cdot W_{cp}} = const = Mi, \quad (3)$$

где  $Mi$  – число Михельсона.

Поскольку ни одна из полуэмпирических теорий стабилизации пламени не позволяет с достаточной точностью производить оценку параметров устойчивости горения, то на практике, последние определяются из эмпирических соотношений, получаемых с учетом выводов указанных теорий.

Типичная эмпирическая зависимость для определения параметров срыва пламя имеет вид:

$$\frac{1}{\alpha_{max}} = \frac{W_{cp}^l}{(C_x \cdot B_{CT})^K \cdot P^m \cdot T^n}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{max}$  – значения коэффициента избытка воздуха на режиме срыва пламени;  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления тела;  $l, K, m, n$  – показатели степени.

В различных источниках приводятся разные значения показателей степеней при параметрах, входящих в формулу (4). Так, в зависимости от вида обтекаемого тела и его расположения относительно потока воздуха величина  $l = 0,45 \div 1,0$ , а  $K = 0,5 \div 1,0$ . Показатели степени  $m$  и  $n$  для различных условий проведения экспериментов изменялись в диапазоне  $m = 0,5 \div 0,95$ ;  $n = 1,0 \div 2,0$  [5–8].

Что же касается исследований, посвященных изучению процессов стабилизации пламени при сжигании неоднородных смесей, то их количество весьма невелико. Так, в качестве примера, отметим работу [9], в которой показано, что и в случае неоднородных смесей параметры срыва пламени существенно зависят от характеристик процесса в зоне рециркуляции. Кроме того, для ситуации, отвечающей сжиганию неоднородной смеси, в опубликованной литературе практически отсутствуют данные об исследовании закономерностей влияния на условия стабилизации горения целого ряда факторов, таких как скорость и температура воздушного потока, ширина стабилизатора, взаимное расположение стабилизаторов и т.д.

#### Формулирование целей статьи (постановка задачи)

В данной работе рассмотрены вопросы влияния режимных и конструктивных факторов на характеристики срыва пламени за плоскими стаби-

лизаторами при подаче газа внедрением в набегающий воздушный поток.

#### Изложение основного материала исследования

Типичные результаты выполненных экспериментальных исследований характеристик срыва пламени в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей топлива внедрением в набегающий поток воздуха представлены на рис. 2, 3. Приведенные данные отвечают следующим значениям параметров горелочного устройства: ширина стабилизатора  $B_{CT} = 15,5; 30$  мм; температура воздуха  $t_b = 80^\circ\text{C}; 350^\circ\text{C}; 800^\circ\text{C}$ ; диаметр газоподводящих отверстий  $d_T = 1,5 \dots 3,8$  мм; относительное расстояние от оси газоподводящих отверстий до срывной кромки стабилизатора  $\bar{l}_1 = l_1/B_{CT} = 0,2 \dots 7,7$ ; относительный шаг расположения газоподводящих отверстий  $\bar{S} = S/d_T = 3,75 \dots 6,3$ , где  $S$  – расстояние между осями отверстий; коэффициент загромождения горелочного устройства:

$$K_f = \frac{\sum f_{CT}}{\sum f_T} = 0,3; 0,45; 0,6,$$

где,  $\sum f_{CT}, f_k$  – площадь поперечного сечения всех стабилизаторов и камеры сгорания, соответственно (коэффициент  $K_f$  изменялся за счет ширины стабилизаторов и их количества); относительная площадь газоподводящих отверстий:

$$\bar{f}_{CT} = \frac{f_{CT}}{\sum f_T} = 12 \dots 42,5,$$

где  $f_{CT}$  – площадь поперечного сечения стабилизатора;  $\sum f_T$  – общая площадь газоподводящих отверстий; размеры камеры сгорания в свету составляли 100x200 мм.

На рис. 2, а показана зависимость коэффициента избытка воздуха при бедном срыве пламени  $\alpha_{max}$  (минимальный расход газа) от скорости воздуха на входе в камеру сгорания при разной относительной площади газоподводящих отверстий  $\bar{f}_{CT}$ . Согласно полученным данным величина  $\alpha_{max}$  обратно пропорциональна скорости  $W_K$ :

$$\alpha_{max} \sim 1/W_K.$$

Кроме того, при увеличении площади газоподводящих отверстий (уменьшении  $\bar{f}_{CT}$ ) устойчивость пламени на бедном срыве улучшается. Это связано с тем, что при большой площади газоподводящих отверстий  $\sum f_T$  дальнобойность газовых струй невелика, так что топливо практически стелется по поверхности стабилизатора и значительная его часть поступает в зону рециркуляции, обеспечивая высокую устойчивость пламени.

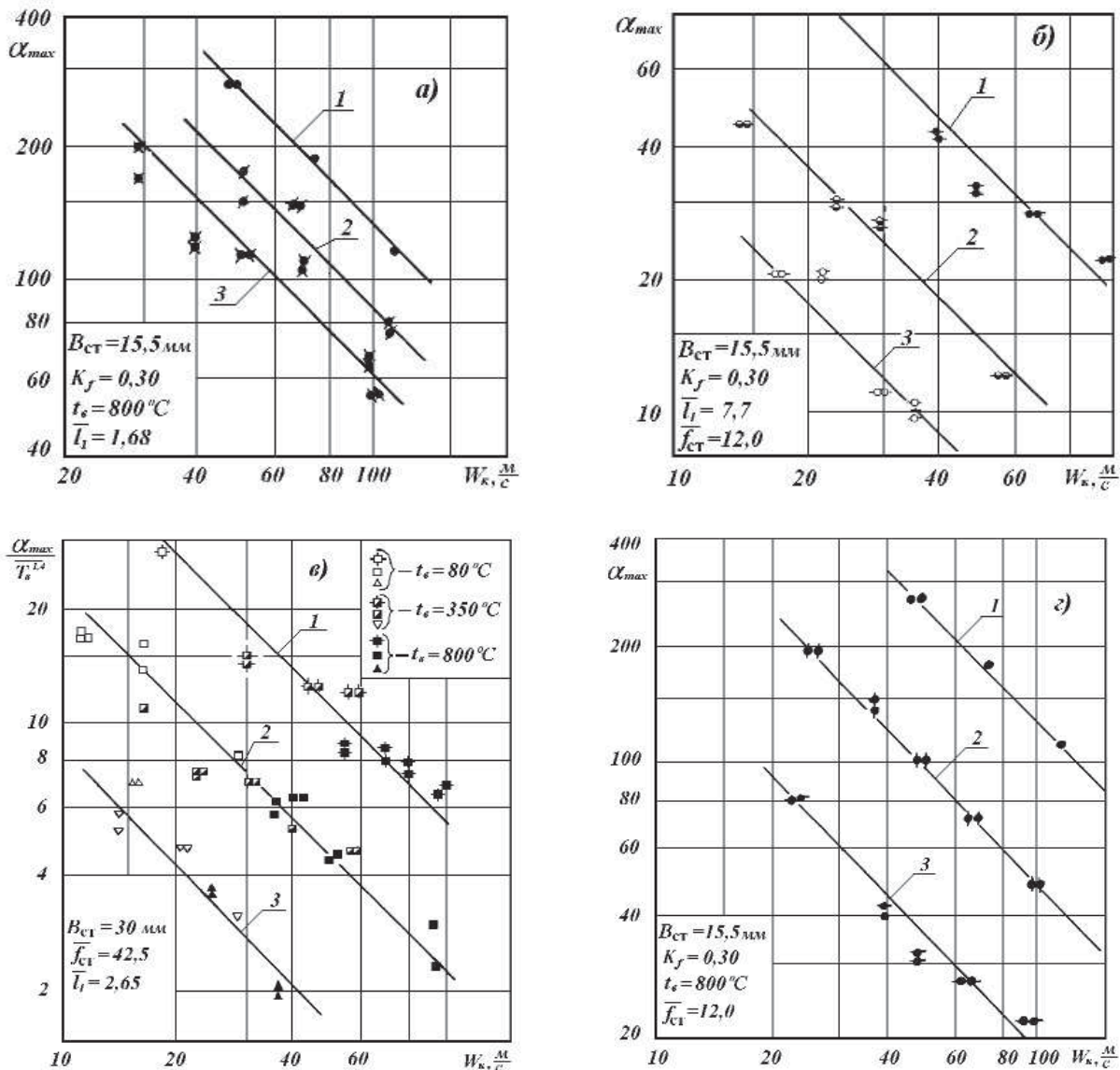


Рис. 2. Зависимость характеристик устойчивости пламени от скорости воздуха на входе в камеру сгорания при варьировании конструктивных и режимных параметров горелочного устройства:

(а) — относительной площади газоподводящих отверстий: 1 —  $\bar{f}_{CT} = 12$ ; 2 — 21,4; 3 — 27,4;

(б) — температуры воздуха на входе в камеру сгорания: 1 —  $t_b = 800^\circ\text{C}$ ; 2 —  $350^\circ\text{C}$ ; 3 —  $80^\circ\text{C}$ ;

(в) — коэффициента загромождения: 1 —  $K_f = 0,3$ ; 2 — 0,45; 3 — 0,6;

(г) — относительного расстояния от газоподводящих отверстий до срывной кромки стабилизатора: 1 —  $\bar{l}_1 = 1,68$ ; 2 — 3,86; 3 — 7,7

При уменьшении площади  $\Sigma f_T$  дальнобойность газовых струй возрастает, в зону рециркуляции за срывной кромкой стабилизатора попадает меньшее количество газа и срывные характеристики горелочного устройства ухудшаются. При этом, как следует из результатов экспериментов:  $\alpha_{\max} \sim 1/f_{CT}$ .

Рис. 2, б иллюстрирует данные исследования по выявлению закономерностей влияния температуры воздуха  $t_b$  перед стабилизаторами на характеристики устойчивости пламени. Как видно, с увеличением температуры  $t_b$ , при прочих равных условиях, устойчивость пламени улучшается. Это обусловлено, главным образом, тем, что при повышении температуры воздуха возрастает нормальная скорость горения, уменьшается требуемая

энергия активации топлива и снижаются потери тепла из зоны рециркуляции. В соответствии с данными экспериментальных исследований влияние предварительного подогрева воздуха на величину  $\alpha_{\max}$  описывается зависимостью:

$$\alpha_{\max} \sim \left( \frac{T_b}{273} \right)^{1,4}$$

На рис. 2, в представлены результаты экспериментальных исследований характеристик срыва пламени при варьировании коэффициента загромождения  $K_f$  камеры сгорания. Как следует из полученных данных, с увеличением  $K_f$  устойчивость пламени ухудшается. Последнее связано с



ростом средней скорости воздуха между стабилизаторами и деформацией профиля скорости на срезе стабилизаторов. Это в свою очередь обуславливает интенсификацию массообменных процессов в зоне рециркуляции, а также уменьшение размеров и тепловой мощности данной зоны, что и является причиной ухудшения срывных характеристик горения. Согласно полученным данным зависимость  $\alpha_{\max}$  от коэффициента загромождения  $K_f$  имеет вид:

$$\alpha_{\max} \sim \exp^{-6,25 \cdot K_f}.$$

Рис. 2, г иллюстрирует особенности влияния на характеристики срыва пламени относительного расстояния  $\bar{l}_1$  от газоподающих отверстий до срывной кромки стабилизаторов. Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением расстояния  $\bar{l}_1$  характеристики срыва пламени ухудшаются. Чем дальше расположены газоподающие отверстия от срывной кромки, тем больше размываются топливные струи по достижении данной кромки и тем меньше топлива попадает в зону рециркуляции. Следствием этого является ухудшение условий стабилизации горения. Зависимость величины  $\alpha_{\max}$  от расстояния  $\bar{l}_1$  в соответствии с полученными экспериментальными данными представима в виде:

$$\alpha_{\max} \sim \frac{1}{\bar{l}_1^2 + 6,3}.$$

В результате анализа данных проведенных экспериментальных исследований получено обобщающая формула, описывающая зависимость от режимных и конструктивных параметров горелочного устройства стабилизаторного типа коэффициента избытка воздуха при бедном срыве пламени за плоскими стабилизаторами:

$$\alpha_{\max} = K_{\max} \frac{B_{cr}^{0,5}}{W_k \cdot e^{6,25 \cdot K_f} \cdot \bar{f}_{cr} \cdot (\bar{l}_1^2 + 6,3)} \cdot \left(\frac{T_g}{273}\right)^{1,4}. \quad (5)$$

На рис. 3 результаты выполненного комплекса испытаний представлены в виде зависимости:

$$P_{\max} = f(W_k),$$

$$\text{где } P_{\max} = \frac{\alpha_{cp}'' \cdot \bar{f}_{cr} \cdot e^{6,25 \cdot K_f} \cdot (\bar{l}_1^2 + 6,3)}{T_0^{1,4} \cdot B_{cr}^{0,5}}.$$

**Выводы**

Проведен комплекс экспериментальных исследований по установлению закономерностей влияния на характеристики бедного срыва пламени

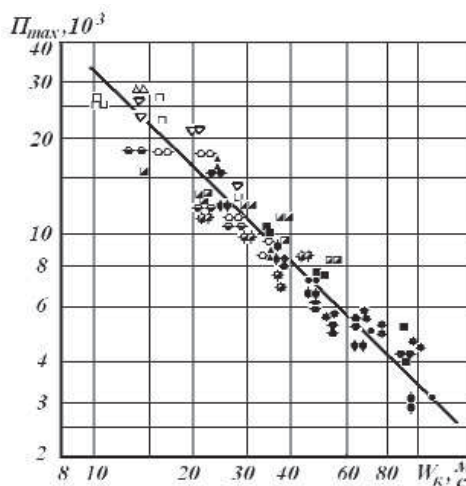


Рис. 3. Обобщающая зависимость параметра устойчивости факела  $P_{\max}$  от скорости воздуха на входе в камеру сгорания

конструктивных и режимных параметров стабилизаторного горелочного устройства с подачей топлива внедрением в набегающий поток воздуха. Получена обобщающая зависимость для определения пределов устойчивой работы горелочных устройств данного типа.

**Литература**

1. Долинский А.А., Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В. Малая энергетика. Состояние разработок и перспективы их развития в Институте технической теплофизики НАН Украины // Пром. теплотехника. — 1997, т.19, №6. — С. 84–90.
2. Актуальные проблемы устойчивого развития. Применение новых технологий сжигания топлива // Акимов В.А., Бридун Е.В., др. / Киев: «Знание», 2003. — 430 с.
3. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Коханенко П.С. Компьютерное моделирование эффектов влияния скоростных напоров горючего и окислителя на структуру течения в условиях микрофакельного сжигания топлива // Материалы XVIII межд. конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта 10–14 июня 2008. — Киев, 2008. — С. 109–111.
4. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Коханенко П.С., Федорченко Л.И. Численные исследования особенностей влияния шага между газоподающими отверстиями на закономерности смесеобразования при микрофакельном сжигании топлива // Материалы XIX межд. конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», Ялта 8–12 июня 2009. — Киев, 2009. — С.177–179.

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

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

7. *Ильяшенко С.М., Талантов А.В.* Теория и расчет прямоточных камер сгорания. — Москва: Машиностроение, 1964. — 306 с.

8. *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. — Москва: Машиностроение, 1961. — 526 с.

9. *Лебедев Б.П., Доктор И.Ю.* О стабилизации неоднородных смесей // Горение и взрыв. — Москва: Наука, 1972. — С. 361–364.