

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

## ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ СТАБИЛИЗАТОРНОГО ТИПА С ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА В СНОСЯЩИЙ ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

### Анотація

*В роботі наведено результати досліджень пускових характеристик, які стосуються запалення факела в стабілізаторних пальникових пристроях з подачею природного газу у повітряний потік крізь систему отворів, розташованих в бокових стінках стабілізаторів. Одержано дані щодо впливу на вказані характеристики таких факторів, як швидкість і температура повітря, розмір та взаємне розташування стабілізаторів і газових отворів та ін.*

### Abstract

*The results of the investigation of ignition characteristics, that consist of the inflammation of gas burners with giving the natural gas into the air flow through a system of holes in stabilizer sidewalls. The data about the influence of indicated characteristics such factors as air velocity and temperature, the width and arrangement of stabilizers, gas holes location etc. are received.*

### Постановка проблемы

Одним из основных требований, которые предъявляются к горелочным устройствам, используемым в камерах сгорания газотурбинных и парогазовых установок, топках энергетических и промышленных котлов, теплогенераторов различного назначения, является обеспечение их надежной работы в широком диапазоне изменения режимных параметров [1, 2, 3].

В работе [4] рассмотрены вопросы, касающиеся устойчивости факела в горелочных устройствах, состоящих из систем плоских стабилизаторов, обтекаемых воздушным потоком. В таких устройствах топливо, природный газ, подается внедрением в сносящий воздушный поток через систему отверстий, расположенных в боковых стенках стабилизаторов. При этом происходит частичное смешение топлива с окислителем, и за стабилизатором реализуется горение полупредварительной топливо-воздушной смеси по микродиффузионному механизму [5]. В данных условиях используется аэродинамическая стабилизация

факела с помощью зон рециркуляции, образующихся в следе за стабилизаторами [6]. Горелочные устройства рассматриваемого типа характеризуются широким диапазоном устойчивой работы по коэффициенту избытка воздуха и скорости воздушного потока, имеют относительно низкий коэффициент потерь давления и просты в изготовлении. Их важным достоинством является также модульность конструкции, то есть возможность обеспечения требуемой мощности горелочного устройства путем изменения количества, взаимного расположения и размера стабилизаторов.

Надежность работы горелочных устройств, как известно, существенно зависит также от их пусковых характеристик и, в частности, первоначального воспламенения факела. Это особенно важно для условий, когда зажигание факела требуется обеспечить на режимах, при которых имеет место изменение температуры, скорости воздушного потока и коэффициента избытка воздуха.

Данное обстоятельство определяет необходимость проведения цикла экспериментальных исследований пусковых характеристик горелочных устройств стабилизаторного типа и установления эффектов влияния на надежность воспламенения факела различных конструктивных и режимных факторов.

### Анализ состояния исследований

При разработке горелочных устройств применяются, как известно, два способа воспламенения горючих смесей, а именно: самовоспламенение и вынужденное зажигание [7].

В первом случае, весь объем горючей смеси постепенно путем подвода теплоты или повышения давления доводится до температуры самовоспламенения, после чего горение смеси осуществляется уже без внешнего воздействия. В энергетических и промышленных горелочных устройствах, как правило, применяется второй из указанных способов. В этой ситуации к некоторому объему движущейся топливо-воздушной смеси подводится определенное количество тепла от постороннего источника, температура которого, как показывает опыт, должна быть на несколько десятков градусов выше температуры воспламенения смеси. В качестве такого источника может



использоваться струя горячих газов (дежурный факел), нагретое тело, искра и т.д. Посторонний источник может быть непрерывно работающим или включаться только при пуске горелочного устройства. С точки зрения надежности и удобства эксплуатации предпочтительным является применение воспламенителя только для первоначального зажигания факела с осуществлением последующей стабилизации горения, например, с помощью зон рециркуляции за счет соответствующего конструктивного исполнения горелочного устройства.

В промышленности и энергетике для запуска различных горелочных устройств широко используются электрические пусковые системы, которые обладают целым рядом достоинств. В таких системах после включения питания и возникновения искры на свече в непосредственной близости от ее поверхности создается избыток тепла и активных центров – заряженных молекул, атомов, радикалов и ионов. При этом резко возрастает скорость реакции окисления топливно-воздушной смеси, находящейся в непосредственной близости от свечи. Если состав смеси отвечает определенным концентрационным пределам, то она воспламеняется с повышением температуры и увеличением количества выделяемого в ходе реакции тепла, которое расходуется на дальнейший разогрев смеси и на компенсацию потерь в окружающую среду. Для реализации указанного повышения температуры и самопроизвольного прогрессивного роста скорости реакции, приток тепла, как очевидно, должен быть больше отмеченных потерь. Самовоспламенение топливно-воздушной смеси происходит по истечении определенного интервала времени, называемого периодом индукции. Величина данного периода зависит от значений энергии активации топлива и критической температуры, при которой подвод и отвод тепла уравниваются.

При зажигании факела с помощью электрической искры требуется некоторая минимальная мощность этой искры, необходимая для его воспламенения. Причем данная мощность зависит от параметров смеси и скорости воздушного потока [7, 8]. Существует также определенный диапазон по коэффициенту избытка окислителя, в пределах которого происходит воспламенение смеси. Границы данного диапазона, называемые пределами воспламенения (богатый и бедный предел), как показывает опыт, оказываются при использовании источника конечной мощности более узкими, чем пределы устойчивости факела [9]. При неограниченном увеличении мощности источника пределы воспламенения расширяются до концентрационных пределов распространения

пламени, которые зависят от вида горючего и окислителя, а также условий организации процесса горения.

Если содержание топлива в смеси меньше нижнего предела воспламенения, то химическая реакция горения может вообще отсутствовать или протекать таким образом, что количество выделившейся при этом теплоты будет недостаточным для нагревания соседних слоев смеси до температуры воспламенения, а значит и для распространения пламени. Такой же эффект наблюдается и при слишком большом содержании топлива в смеси. В этом случае недостаток кислорода в воздухе, подаваемом на горение, приводит к снижению температурного уровня смеси вблизи источника зажигания, в результате чего соседние слои смеси также не нагреваются до температуры воспламенения.

Исследованию воспламенения факела в различных горелочных устройствах посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [см., например, 3–8]. Однако, ввиду сложности происходящих в данных условиях процессов до настоящего времени не разработаны общепринятые представления о механизме зажигания и не созданы инженерные методы расчета соответствующих технических средств.

В работах [6–8] рассмотрены вопросы, касающиеся зажигания предварительно перемешанных смесей с помощью искрового разряда при наличии в камерах сгорания зон рециркуляционного течения. Указывается, что для создания оптимальных условий зажигания свеча должна располагаться в пределах зоны рециркуляции так, чтобы ядро горячего газа, созданное искрой, переносилось возвратным течением вверх против направления движения основного потока. В этом случае некоторая доля локального объема воспламенившегося газа остается в зоне возвратного течения, циркулируя в ней, а остальная часть, распространяясь за пределы данной зоны, нагревает набегающий поток топливно-воздушной смеси так, что, в конечном итоге, вся зона обратных токов оказывается заполненной горячими газами.

Задача об установлении предельных условиях зажигания топливно-воздушной смеси с помощью накаливаемого тела рассматривается в работах С.А. Гольденберга и Л.Н. Хитрина [9, 10 и др.]. Согласно предложенной в этих работах модели роль накаливаемого тела заключается в создании в слое газа, прилегающему к телу, такой температуры, при которой количество тепла  $q_2$ , выделяемое в результате реакции горения газов в этой зоне, становится больше тепла  $q_1$ , которое отводится из этой зоны во внешнюю среду. Температура, при которой достигается условие  $q_1 = q_2$ , является температурой зажигания смеси,

и ее значение всегда превышает температуры самовоспламенения  $- T_B$ .

Тепло  $q_2$ , выделяющееся за счет реакции горения в тонком слое толщиной  $\xi$  вблизи поджигающего тела, согласно [8], определяется выражением:

$$q_2 = \left[ 2 \cdot \lambda \cdot Q \int_{T_\xi}^{T_s} W(C, T) dT \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – теплота сгорания газа;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности смеси;  $W(C, T)$  – скорость реакции, являющаяся функцией концентрации  $C$  и температуры  $T$ ;  $T_s$  и  $T_\xi$  – абсолютная температура газов у стенки и на границе слоя. Для электрической свечи  $T_s$  – абсолютная температура разрядного промежутка.

Уравнение для определения количества теплоты  $q_1$ , отдаваемой слоем за счет теплоотдачи в поток смеси, имеет вид:

$$q_1 = \alpha_T (T_\xi - T_0), \quad (2)$$

где  $T_0$  – абсолютная температура холодной смеси в зоне обратных токов;  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи. Последний находится из соотношения

$$\alpha_T = \frac{\lambda}{d} Nu, \quad (3)$$

где  $d$  – определяющий размер;  $Nu$  – число Нуссельта.

С учетом выражений (1)–(3) условие зажигания, отвечающее равенству  $q_1 = q_2$ , представлено в виде:

$$\frac{\lambda}{d} Nu (T_\xi - T_0) = \left[ 2 \cdot Q \cdot \lambda \int_{T_\xi}^{T_s} W(C, T) dT \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Из уравнения (4), используя положения теории распространения пламени, после соответствующих преобразований может быть получена следующая зависимость, описывающая условия зажигания

$$\frac{W_{кр} d}{\nu} = A \left( \frac{U_n d}{a} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (5)$$

где  $W_{кр}$  – критическая скорость движения смеси, при которой происходит ее воспламенение;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $U_n$  – нормальная скорость распространения пламени;  $a$  – коэффициент температуропроводности смеси. Величины  $A$  и  $n$  определяются из опытов и зависят от способа стабилизации, условий теплообмена в зоне обратных токов, а также гидродинамических условий течения.

Проведенный анализ литературных данных [6–11] показывает также, что зависимости для условий зажигания факела и стабилизации пламени, как правило, имеют одинаковый вид. Отличия заключаются лишь в численных значениях эмпирических коэффициентов, входящих в соответствующие формулы.

### Формулировка целей статьи

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование особенностей пусковых характеристик, касающихся воспламенения факела в горелочных устройствах со стабилизацией пламени в следе за решеткой плоских стабилизаторов, обтекаемых воздушным потоком, и с подачей топлива внедрением в этот поток через систему газовых отверстий, размещенных на боковых стенках стабилизаторов.

### Изложение основного материала исследования

В настоящем исследовании для зажигания факела использовалась свеча поверхностного разряда типа СД-55 АНМ56 с источником питания постоянного тока напряжением 24 В. Схема расположения кольцевого искрового промежутка свечи для рассматриваемых систем стабилизаторов показана на рис. 1.

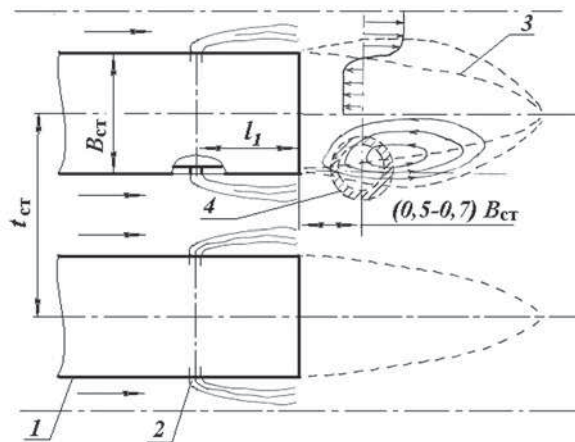


Рис. 1. Схема расположения искрового промежутка свечи поверхностного разряда при исследовании пусковых характеристик горелочных устройств:

1 – стабилизатор; 2 – газоподающее отверстие; 3 – границы зоны рециркуляции; 4 – кольцевой искровой промежуток

В соответствии с рекомендациями, предложенными в работе А. Лефевра [8], в данном исследовании свеча устанавливалась таким образом, чтобы часть искрового промежутка попадала в область возвратного течения зоны циркуляции за стабилизатором. Результаты экспериментов показали, что оптимальное расстояние от оси искрового промежутка до срывной кромки стабилизатора составляет  $(0,5-0,7) B_{ст}$ . Что касается места

положения искрового промежутка по высоте канала, то здесь принимались во внимание следующие соображения. В рассматриваемых горелочных устройствах рабочий процесс характеризуется тем, что на стадии воспламенения топлива коэффициент избытка воздуха  $\alpha_{\text{зак}}$  значительно больше единицы, так что топливо выходит из отверстий с небольшой скоростью и, соответственно, газовые струи имеют малую дальность. Основная часть газа при этом стелется вблизи поверхности стабилизатора, смешиваясь в пограничном слое с окислителем, в основном, за счет турбулентной диффузии. Причем в процессе предварительного смесеобразования, как очевидно, участвует не весь окислитель, а только его часть. Ввиду этого в закормовой области стабилизатора зоны максимальных концентраций газа наблюдаются непосредственно вблизи его срывных кромок. Поэтому часть кольцевого искрового промежутка свечи должна также захватывать указанные зоны (см. рис. 1).

ной кромки стабилизаторов изменялось в диапазоне  $\ell_1 = 6,0-120$  мм (см. рис. 1). Размеры камеры сгорания в свету в месте установки стабилизаторов составляли  $100 \times 200$  мм.

При проведении исследований в широких пределах варьировалась скорость воздушного потока в камере перед стабилизаторами

$$(W_k = 10-100 \text{ м/с}),$$

где

$W_k = G_B / \rho_B \cdot f_k$ ;  $G_B$  – расход воздуха;  $\rho_B = p_B / R_B \cdot T_B$  – плотность воздуха;  $p_B$  – давление в камере;  $R_B$  – газовая постоянная воздуха;  $T_B$  – абсолютная температура воздуха. Исследования проводились при температуре воздуха  $t_B = 80^\circ\text{C}$ ;  $350^\circ\text{C}$ ;  $800^\circ\text{C}$ .

В табл. 1 сведена информация о конструктивных параметрах испытанных горелочных устройствах, уровнях температур воздуха, а также даны обозначения серий проведенных опытов, используемые на рис. 1–7, которые иллюстрируют основные результаты исследований.

Таблица 1

Конструктивные параметры испытанных горелочных устройств, значения температур воздуха  $t_B$  и обозначения серий экспериментов на рис. 1–7

Конструктивные параметры горелочных устройств						Обозначения на графиках		
						Температура воздуха $t_B$ , °C		
$\bar{S}$	$B_{\text{ст}}$ , мм	$K_f$	$d_T$ , мм	$\bar{f}_{\text{ст}}$	$\bar{\ell}_1$	80	350	800
3,75	15,5	0,30	3,2	12,0	1,68			•
5,0	15,5	0,30	2,4	21,4	1,68			◐
6,3	15,5	0,30	1,9	34,0	1,68			◑
3,75	15,5	0,30	3,2	12,0	3,85			◒
3,87	15,5	0,30	3,8	27,4	1,68			◔
3,75	15,5	0,30	3,2	12,0	7,70	◕	◖	◗
5,67	30,0	0,30	3,0	42,5	2,65	◘	◙	◚
5,67	30,0	0,450	3,0	42,5	0,20	◛	◜	◝
5,67	30,0	0,45	3,0	42,5	2,65	◞	◟	◠
5,67	30,0	0,60	3,0	42,5	2,65	◡	◢	◣

В настоящей работе исследованы пусковые характеристики горелочных устройств со следующими геометрическими параметрами: высота стабилизатора составляла  $H_{\text{ст}} = 100$  мм, ширина стабилизатора  $B_{\text{ст}} = 15,5$  мм и 30 мм; коэффициент загромождения горелочного устройства  $K_f = \Sigma f_{\text{ст}} / f_k = 0,30$ ; 0,45; 0,60, где  $\Sigma f_{\text{ст}}$ ,  $f_k$  – соответственно суммарная площадь поперечного сечения всех стабилизаторов и камеры сгорания в свету в месте установки стабилизаторов (в случае использования стабилизаторов постоянной ширины  $K_f = B_{\text{ст}} / t_{\text{ст}}$ ); диаметр газоподающих отверстий равнялся  $d_T = 1,5-3,8$  мм, а относительный шаг их расположения, который выбирался из условия обеспечения «беглости» огня между отверстиями [11], составлял  $\bar{S} = S_T / d_T = 3,75-6,3$ , где  $S_T$  – расстояние между осями отверстий; расстояние от газоподающих отверстий до срыв-

На рис. 2 приведены данные экспериментальных исследований зависимости от скорости набегающего потока  $W_k$  коэффициента избытка воздуха на режимах бедного срыва  $\alpha_{\text{max}}$  и воспламенения факела  $\alpha_{\text{зак}}$  при температуре воздуха  $t_B = 350^\circ\text{C}$  для горелочного устройства со следующими основными геометрическими характеристиками:  $B_{\text{ст}} = 30$  мм;  $K_f = 0,45$ ;  $\ell_1 = 80$  мм;  $d_T = 3,0$  мм;  $\bar{S} = 5,67$ .

Согласно полученным результатам, в связи с необходимостью подвода дополнительной энергии активации для воспламенения факела в горелочном устройстве, предел зажигания оказывается меньше предела устойчивости факела, то есть  $\alpha_{\text{зак}} < \alpha_{\text{max}}$ , что соответствует известным данным о соотношении этих величин для предварительно подготовленной смеси [9]. В соответствии с экспериментальными данными коэффициент избытка

воздуха на режиме воспламенения факела обратно пропорционален скорости воздушного потока  $\alpha_{\text{заж}} \sim 1/W_K$ .

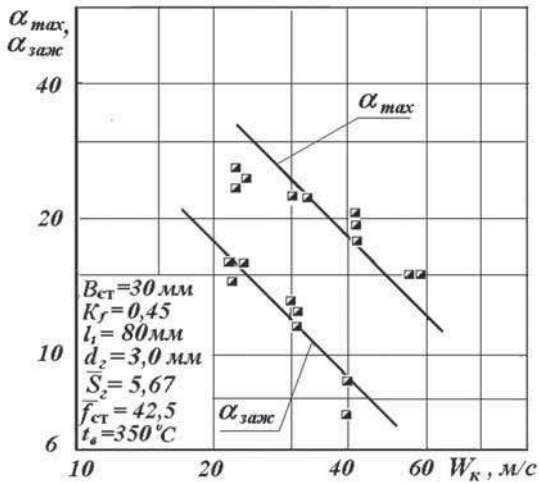


Рис. 2. Характеристики бедного срыва  $\alpha_{\text{max}}$  и воспламенения факела  $\alpha_{\text{заж}}$  для горелочного устройства стабилизаторного типа

Рис. 3 иллюстрирует влияние отношения площадей  $\bar{f}_{\text{CT}}$  поперечного сечения стабилизатора и газоподающих отверстий на характеристики воспламенения факела в условиях изменения скорости воздушного потока при  $B_{\text{CT}} = 15,5$  мм;  $K_f = 0,30$ ;  $l_1 = 26$  мм;  $f_{\text{CT}} = 12,0$  и  $34,0$ ;  $t_b = 800^\circ\text{C}$ . (Здесь  $f_{\text{CT}} = \bar{f}_{\text{CT}}/\Sigma f_r$ , где  $\Sigma f_r$  – суммарная площадь газовых отверстий;  $\Sigma f_r = n_r \cdot \pi d_r^2/4$ ;  $n_r$  – общее количество газовых отверстий с обеих сторон ста-

билизатора). Целесообразность применения при проведении анализа параметра  $\bar{f}_{\text{CT}}$  обусловлена

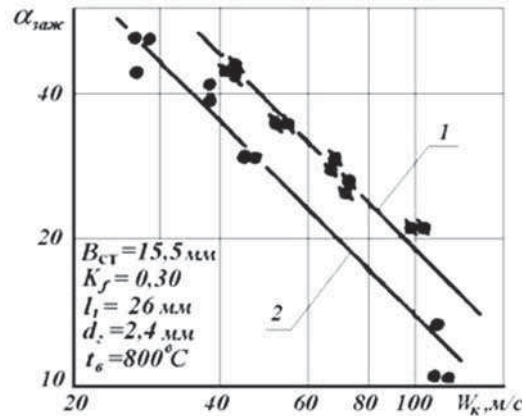
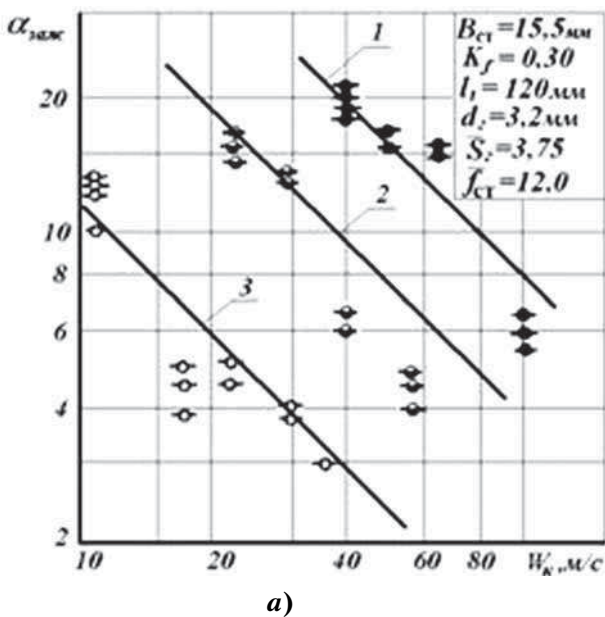


Рис. 3. Зависимость коэффициента избытка воздуха при воспламенении факела от скорости воздуха перед стабилизаторами в камере сгорания для различных значений относительной площади  $\bar{f}_{\text{CT}}$ :

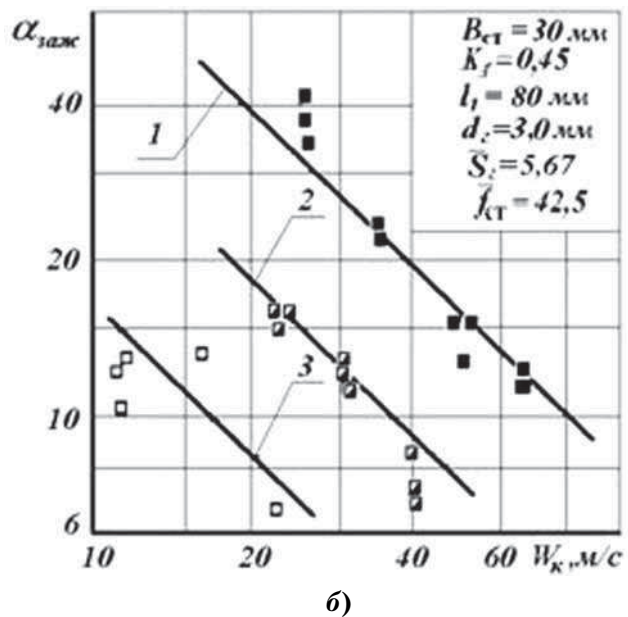
$$1 - \bar{f}_{\text{CT}} = 34,0; 2 - \bar{f}_{\text{CT}} = 12,0$$

тем, что от него в большей мере зависит соотношение расходов воздуха и газа в зоне обратных токов и, соответственно, условия зажигания.

Результаты испытаний показывают, что в исследованном диапазоне изменения значений  $\bar{f}_{\text{CT}}$  при уменьшении относительной площади газоподающих отверстий (увеличении  $\bar{f}_{\text{CT}}$ ) характеристики воспламенения факела улучшаются и значение  $\alpha_{\text{заж}}$  повышается. Это связано с тем, что с ростом  $\bar{f}_{\text{CT}}$  происходит увеличение степени



а)



б)

Рис. 4. Изменение  $\alpha_{\text{заж}}$  в зависимости от скорости  $W_K$  для двух горелочных устройств а) и б) с различными конструктивными параметрами при разных значениях температуры воздуха на входе в камеру сгорания:

$$1 - t_b = 800^\circ\text{C}; 2 - 350^\circ\text{C}; 380^\circ\text{C}$$

диффузионности процесса смесеобразования, которое положительно сказывается на условиях зажигания. Из анализа полученных данных следует, что величина  $\alpha_{\text{зак}} \sim (f_{\text{СТ}})^{0,35}$ .

Что касается диаметра газоподающих отверстий, то в проведенных исследованиях его влияние на характеристики зажигания не обнаружено.

На рис 4, а, б для двух горелочных устройств представлены данные исследований по выявлению влияния на характеристики воспламенения факела температуры воздуха на входе в камеру сгорания ( $t_{\text{в}} = 80^\circ\text{C}; 350^\circ\text{C}; 800^\circ\text{C}$ ). Как видно, с увеличением температуры окислителя коэффициент избытка воздуха на режимах зажигания растет в соответствии с соотношением  $\alpha_{\text{зак}} \sim (T_{\text{в}}/273)^{1,4}$ . При повышении температуры воздуха увеличивается скорость распространения пламени, расширяются пределы устойчивого горения, уменьшается требуемая для воспламенения факела энергия активации и снижаются потери тепла из зоны рециркуляции в набегающий поток газо-воздушной смеси.

Как показали результаты исследований, одним из важных параметров, оказывающих влияние на характеристики зажигания факела, является расстояние  $l_1$  от оси газоподающих отверстий до срывной кромки стабилизатора. При увеличении расстояния  $l_1$  повышается степень предварительного смешения топлива и воздуха и уменьшается относительное количество газа, поступающего в зону рециркуляции, что, как очевидно, должно обуславливать ухудшение условий воспламенения. Для анализа совместного влияния на  $\alpha_{\text{зак}}$  степени предварительного смешения топлива и окислителя, в большой мере определяемого величиной  $l_1$ , а также характеристик зоны рециркуляции, существенно зависящих от ширины стабилизатора  $B_{\text{СТ}}$ , предложено использовать параметр  $\bar{l}_1 = l_1 / B_{\text{СТ}}$ .

Рис. 5 иллюстрирует результаты экспериментальных исследований зависимости  $\alpha_{\text{зак}}$  от скорости воздуха  $W_{\text{к}}$  при различных значениях параметра  $\bar{l}_1 = 1,68; 3,86; 7,7$ .

Приведенные данные обобщаются соотношением  $\alpha_{\text{зак}} \sim 1 / (\bar{l}_1 + 5,65)$ .

На рис. 6 приведены данные натурных экспериментов по установлению эффектов влияния коэффициента загромождения горелочного устройства на характеристики воспламенения факела. Как видно из рисунка, с увеличением  $K_f$  характеристики воспламенения факела ухудшаются. В работе [12] показано, что с ростом коэффициента загромождения повышается расход воздуха в зону рециркуляции и, соответственно, коэффициент избытка воздуха в ней  $\alpha_{\text{зот}} \sim K_f \cdot (1 + K_f)$ . При этом происходит также более интенсивное рассеивание топлива в набегающем потоке воздуха и

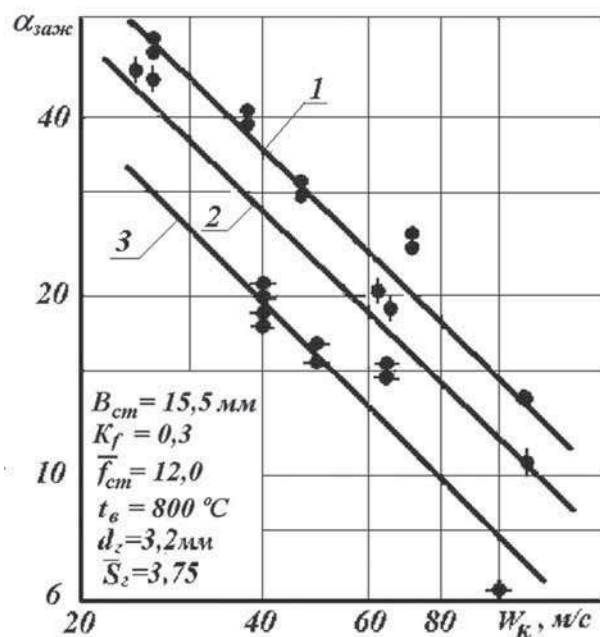


Рис. 5. Зависимость  $\alpha_{\text{зак}} = f(W_{\text{к}})$  при различных величинах относительного расстояния газоподающих отверстий от срывной кромки стабилизатора:

1 -  $l_1 = 1,68$ ; 2 -  $l_1 = 3,86$ ; 3 -  $l_1 = 7,70$

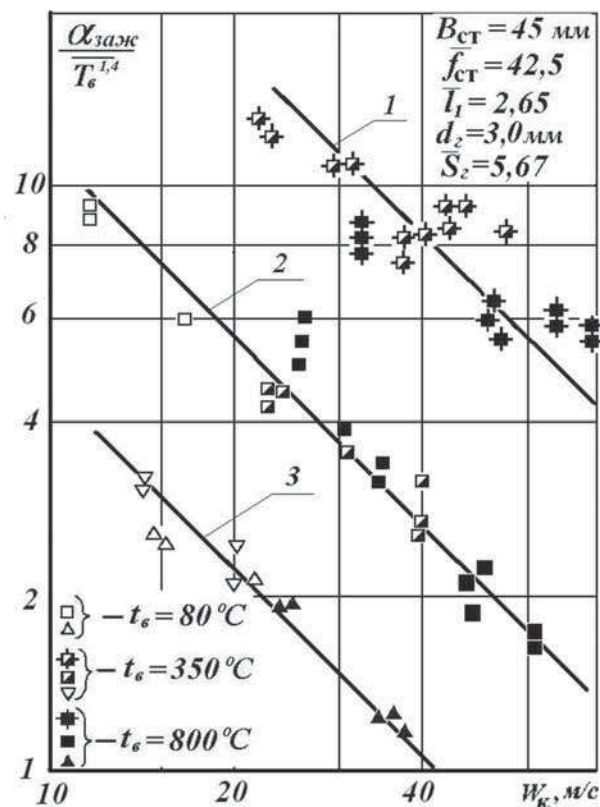


Рис. 6. Изменение  $\alpha_{\text{зак}}$  в зависимости от скорости  $W_{\text{к}}$  при различных значениях коэффициента загромождения горелочного устройства:

1 -  $K_f = 0,30$ ; 2 -  $0,45$ ; 3 -  $0,60$

уменьшается его доля, попадающая в зону рециркуляции В соответствии с полученными результа-

тами зависимость коэффициента избытка воздуха при воспламенении факела от коэффициента загромождения имеет вид  $\alpha_{\text{заж}} \sim [K_f \cdot (1 + K_f)]^{-2,4}$ .

В результате анализа экспериментальных данных, полученных в ходе выполнения цикла исследований по определению характеристик зажигания в горелочных устройствах стабилизаторного типа при использовании в качестве источника поджигания электрической свечи, предложена обобщающая зависимость для нахождения коэффициента избытка воздуха на режиме воспламенения при варьировании различных геометрических и режимных факторов

$$\alpha_{\text{заж}} = K_{\text{заж}} \frac{B_{\text{СТ}}^{0,5} (\bar{f}_{\text{СТ}})^{0,35}}{W_{\text{к}} \cdot [K_f (1 + K_f)]^{2,4} (\bar{l}_1 + 5,65)} \cdot \left(\frac{T_{\text{в}}}{273}\right)^{1,4} \quad (6)$$

Для испытанных систем стабилизаторов эмпирический коэффициент  $K_{\text{заж}} = 16,8$ . При обработке опытных данных размерность ширины стабилизатора  $B_{\text{СТ}}$  принималась в мм, а скорость воздушного потока  $W_{\text{к}}$  — в м/с.

На рис. 7 результаты выполненного комплекса экспериментальных исследований представлены в виде зависимости параметра зажигания  $P_{\text{заж}}$  от скорости воздуха  $W_{\text{к}}$  в камере сгорания перед горелочным устройством, где

$$P_{\text{заж}} = \frac{\alpha_{\text{заж}} [K_f (1 + K_f)]^{2,4} (\bar{l}_1 + 5,65)}{B_{\text{СТ}}^{0,5} (T_{\text{в}})^{1,4} (\bar{f}_{\text{СТ}})^{0,35}} \quad (7)$$

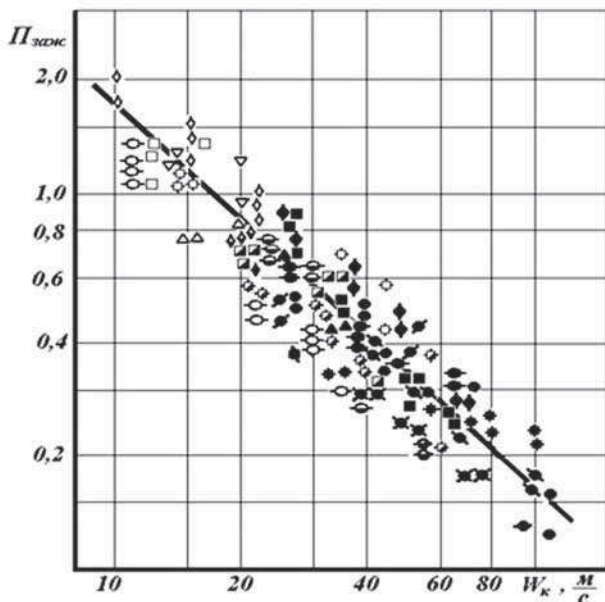


Рис. 7. Зависимость параметра зажигания  $P_{\text{заж}}$  факела от скорости воздуха на входе в камеру сгорания для горелочных устройств стабилизаторного типа с подачей топлива внедрением в набегающий поток

### Выводы

В результате проведения цикла экспериментальных исследований, связанных с определением характеристик воспламенения факела в стабилизаторных горелочных устройствах, установлены закономерности влияния на эти характеристики различных режимных и конструктивных факторов. Предложена обобщающая зависимость для расчета пусковых характеристик горелочных устройств рассматриваемого типа в широком диапазоне изменения параметров.

### Литература

1. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 352 с.
2. Актуальные проблемы устойчивого развития. Применение новых технологий сжигания топлива // Акимов В.А., Бريدун Е.В. и др. — Киев: Знание, 2003. — 430 с.
3. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Васильев В.Д. и др. Проблема и пути создания молотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ // Теплоэнергетика. — 2006, № 7. — С. 22–29.
4. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Фиалко Н.М. Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток // Технологические системы. — 2010, № 3(52). — С.72–76.
5. Франк-Каменецкий Д.А., Минский Е.М. Микродиффузионное турбулентное горение // Доклады Академии наук СССР, 1945, т.1. — С. 353–354.
6. Раушенбах Б.В., Белый С.А. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1964. — 526 с.
7. Щетинков Е.С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965. — 739 с.
8. Лёфевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. — М.: Мир, 1986. — 566 с.
9. Гольденберг С.А., Хитрин Л.Н. Тепловая теория зажигания газовых смесей и предельные явления // Известия АН СССР, ОТН. 1957. — № 3. — С. 142–155.
10. Хитрин Л.Н. Теория горения потока газовых смесей и критические характеристики его зажигания. — В кн. Теория и практика сжигания газа. — М.: Гостоптехиздат, 1958. — С. 94–115.
11. Спейшер В.А. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. — М.: Энергия, 1967. — 250 с.
12. Бутовский Л.С. Влияние режимных и конструктивных факторов на диффузионное сжигание газа за стабилизаторами. Автореф. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — Киев. КПИ. 1983. — 16 с.