

давления  $p_{2p.y}$  на  $\Delta p = \frac{p_{p.k} - p_{2p.y}}{p_{2p.y}} \cdot 100\% = 0,5\%$ , то переходный процесс длится всего лишь 0.05 сек.

Полученные соотношения для определения параметров системы на установившихся и переходных режимах дают возможность составить программу расчета на ЭВМ, что, естественно, позволит рассчитать большое число вариантов для определения оптимального сочетания параметров и основных размеров системы. Такая программа была составлена для ЭВМ М-220. Расчетный анализ, выполненный с использованием расчетов по этой программе, показал, что переходный процесс в рассматриваемой системе протекает достаточно быстро.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя, М., «Наука», 1969.
2. Краснощекоев Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. Госэнергоиздат, М.-Л., 1963.
3. Идельчик И. Е. Гидравлические сопротивления. М.-Л., Госэнергоиздат, 1954.

**В. В. Токарев**

## ЗАВИСИМОСТЬ ДИАПАЗОНА УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА, ПОДАВАЕМОГО В ЗОНУ РЕЦИРКУЛЯЦИИ, ОТ ФОРМЫ СТАБИЛИЗАТОРА ПЛАМЕНИ

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\beta$  — угол раскрытия стабилизатора;  
 $V$  — скорость воздуха перед стабилизатором;  
 $V_{сст}$  — скорость воздуха на кромке стабилизатора;  
 $b$  — ширина основания стабилизатора;  
 $H$  — высота канала камеры;  
 $G_{в}$  — расход воздуха через камеру;  
 $G_{в.р}$  — расход воздуха через зону рециркуляции;  
 $G = \frac{G_{в.р}}{G_{в}}$  — относительный расход воздуха через зону рециркуляции;  
 $G_{т}$  — расход топлива;  
 $\varepsilon = \frac{b}{H}$  — степень загромождения стабилизатором канала камеры;  
 $\alpha = \frac{G_{в} \cdot \varepsilon}{G_{т} \cdot L_0}$  — коэффициент избытка воздуха;  
 $L_0$  — стехиометрический коэффициент;  
 $C_x$  — коэффициент сопротивления стабилизатора;  
 $\tau_{п}$  — время пребывания вещества в зоне рециркуляции.

Впрыскивание топлива в зону рециркуляции за плохообтекаемым телом (стабилизатором пламени) находит широкое применение в практике конструирования камер сгорания газотурбинных двигателей [1].

При разработке камер сгорания с высокой эффективностью горения необходимо стремиться к сжиганию наибольшего количества топлива в пределах зоны рециркуляции, поскольку из-за больших значений интенсивности турбулентности (40÷50%) горение топлива протекает во всем объеме зоны рециркуляции на режиме, близком к режиму горения готовых горючих смесей [1].

Топливо, не сгоревшее в зоне рециркуляции, догорает за ее пределами в процессе турбулентного перемешивания с воздухом. Вследствие меньшей турбулентности, к тому же затухающей по мере удаления от стабилизатора, процесс выгорания протекает с заметно падающей интенсивностью.

Количество топлива, которое может быть сожжено в зоне рециркуляции, определяется, во-первых, положением границы устойчивого горения богатой смеси в координатах  $V, \alpha$ , т. е. шириной диапазона устойчивого горения, а во-вторых, количеством воздуха, поступающего в нее. Расширение диапазона устойчивого горения в сторону богатых смесей позволило бы увеличить долю топлива, сгорающего в пределах зоны рециркуляции.

Исследования, выполненные в предположении, что массообмен между зоной рециркуляции и обтекающим потоком происходит путем турбулентной диффузии, показывают, что количество этого воздуха пропорционально скорости обтекающего потока [2]. Величина этой скорости определяется аэродинамическими характеристиками плохообтекаемого тела, т. е. его формой (углом раскрытия), размерами, а также степенью загромождения им сечения камеры.

В статье рассматривается влияние формы плохообтекаемого тела (угла раскрытия) при различных степенях загромождения на диапазон устойчивого горения.

В опытах с гомогенными смесями при отсутствии жидкой фазы влияния формы стабилизатора на диапазон не обнаружено [3, 5].

Эксперименты по определению влияния формы стабилизатора на устойчивость процесса горения проводились с плохообтекаемыми телами  $V$ -образной формы длиной 210 мм, шириной основания 40 мм и 80 мм, с углами раскрытия 30, 90 и 150°.

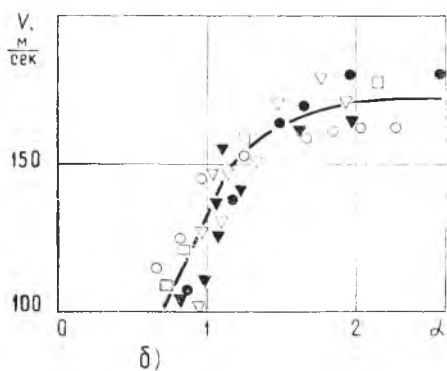
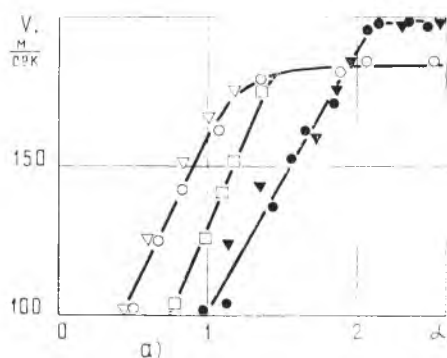
Топливо (керосин) впрыскивалось в зону рециркуляции через две центробежные форсунки, расположенные с шагом 100 мм.

На рис. 1 изображены границы устойчивого горения богатой смеси при степенях загромождения канала стабилизатором 0,2; 0,28 и 0,4.

Границы горения, соответствующие бедным смесям, не определялись, так как установка не позволяла получать малые расходы топлива, необходимые для их определения.

Рис. 1. Зависимость границы срыва пламени богатой смеси от угла раскрытия стабилизатора при  $T^* = 673^\circ\text{K}$ :

- а)  $\blacktriangledown - \beta = 30^\circ$   
 $\square - \beta = 90^\circ$   
 $\nabla - \beta = 150^\circ$  }  $b = 40 \text{ м.м.}, \epsilon = 0,2;$
- $\bullet - \beta = 20^\circ$   
 $\circ - \beta = 150^\circ$  }  $b = 80 \text{ м.м.}, \epsilon = 0,28;$
- б)  $\square - \beta = 30^\circ$   
 $\blacktriangledown - \beta = 90^\circ$   
 $\nabla - \beta = 150^\circ$  }  $b = 80 \text{ м.м.}, \epsilon = 0,28;$
- $\bullet - \beta = 30^\circ$   
 $\circ - \beta = 150^\circ$  }  $b = 80 \text{ м.м.}, \epsilon = 0,4 \text{ м};$



Из результатов экспериментов следует, что с увеличением угла раскрытия границы устойчивого горения богатой смеси смещаются в сторону меньших коэффициентов избытка воздуха до величины, близких полученным для стабилизаторов с углом раскрытия  $150^\circ$  (рис. 1а). Например, при скорости потока  $120 \text{ м/сек}$  граница устойчивости смещается с  $\alpha = 1,2$  ( $\beta = 30^\circ$ ) до  $\alpha = 0,6$  ( $\beta = 150^\circ$ ).

Такое влияние угла раскрытия на диапазон горения обусловлено следующим. Увеличение угла раскрытия сопровождается уменьшением времени пребывания  $\tau_d$  вещества в зоне рециркуляции, т. е. усилением процесса турбулентного обмена [6]. Эксперименты со стабилизаторами, за которыми в зону рециркуляции впрыскивается жидкое топливо, показывают, что при усилении процесса турбулентного обмена происходит расширение диапазона устойчивого горения в сторону богатых смесей [7].

С увеличением степени загромождения влияние угла раскрытия ослабевает, и при  $\epsilon = 0,4$ :  $v = 80 \text{ мм}$  и  $\epsilon = 0,28$ ;  $v = 40 \text{ мм}$  границы срыва практически совпадают (рис. 1б).

Уменьшение максимальной скорости срыва пламени со  $185 \text{ м/сек}$  при  $\epsilon = 0,28$  до  $160 \text{ м/сек}$  при  $\epsilon = 0,4$  обусловлено тем,

что при  $\epsilon=0,4$  достигается скорость потока на кромке стабилизатора  $V_{ст}$ , равная скорости  $V_{ст}$  при  $\epsilon=0,28$ .

Разницу в величинах степеней загромождения, при которых исчезает влияние угла раскрытия на диапазон горения можно объяснить следующим. Время пребывания  $\tau_n$  вещества в зоне рециркуляции, характеризующее ее массообмен с потоком, пропорционально ширине основания стабилизатора [2]

$$\tau_n = k \frac{b}{v} . \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Из этой формулы видно, что при увеличении ширины основания стабилизатора для сохранения  $\tau_n$  неизменным требуется большая степень загромождения канала, то есть большая скорость потока, обтекающего стабилизатор, от величины которой зависит количество воздуха, поступающего в зону рециркуляции [8].

Как показал эксперимент, при достижении некоторой величины степени загромождения влияние угла раскрытия на диапазон устойчивого горения исчезает.

Исследования структуры течения в следе за плохообтекаемыми телами, выполненные различными авторами [9], [10], [11], показывают следующее.

При значениях  $\epsilon$  до  $0,3 \div 0,36$  процесс обтекания тела подчиняется закономерностям свободного турбулентного следа. С увеличением степени загромождения все большее значение приобретают явления, присущие полуограниченному струйным течениям, для которых характерным размером, определяющим аэродинамическую структуру течения в следе, служит ширина канала между его кромкой и стенкой камеры. При этом наблюдается рост завихренности в следе и турбулизация всего потока в плоскости обтекаемого тела [10], [11].

На рис. 2 показана зависимость относительного расхода воздуха через зону рециркуляции от скорости на кромке стабилизатора. Зависимость получена по данным, приведенным в работе [8].

Из рисунка следует, что при постоянной скорости потока  $V_{ст}$ , описанное выше изменение характера течения в следе за плохообтекаемым телом (с ростом  $\epsilon$ ) сопровождается увеличением расхода воздуха через зону рециркуляции. Это и приводит к увеличению количества тепла, сгорающего в зоне рециркуляции за стабилизаторами с углом раскрытия  $30$  и  $90^\circ$  при увеличении  $\epsilon$  (см. рис. 16). Отсутствие влияния  $\epsilon$  на процесс горения за стабилизатором с углом  $150^\circ$  обусловлено тем, что в этом случае достигается предел распространения пламени для данных условий ( $\alpha$ ,  $V$  и  $T$ ).

Полученные зависимости, характеризующие влияние формы стабилизатора (угла раскрытия) на диапазон устойчивого горе-

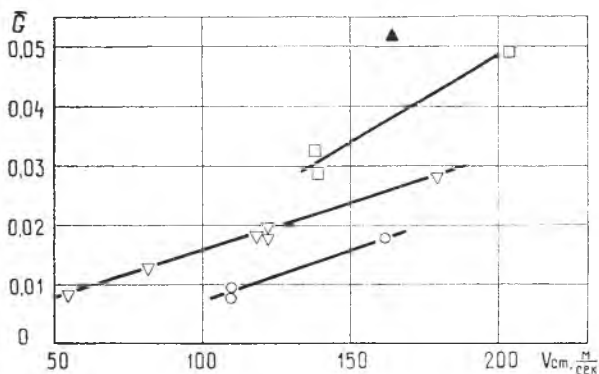


Рис. 2. Зависимость относительного расхода воздуха через зону рециркуляции от скорости потока на кромке стабилизатора при различных степенях загромождения канала:  
 $I^* = 773^\circ\text{K}$   $\beta = 30^\circ$ .

○ —  $\epsilon = 0,175$ ; ▽ —  $\epsilon = 0,25$ ; □ —  $\epsilon = 0,34$ ; ▲ —  $\epsilon = 0,445$ ;

ния, можно обобщить (при прочих одинаковых условиях), пользуясь соотношением

$$\frac{V_{ст}}{C_x} = f(\alpha) \quad (2)$$

Скорость на кромке стабилизатора  $V_{ст}$  в формуле (2) определяется выражением

$$q(\lambda_{ст}) = \frac{q(\lambda)}{1 - \zeta},$$

где  $q(\lambda)$  — газодинамическая функция.

Величина  $C_x$  принимается для каждого угла раскрытия стабилизатора в зависимости от степени загромождения. На рис. 3 изображены результаты обобщения данных, полученных в экспериментах с помощью формулы (2). Они достаточно удовлетворительны.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1. Увеличение угла раскрытия стабилизатора расширяет диапазон устойчивого горения в сторону богатых смесей.

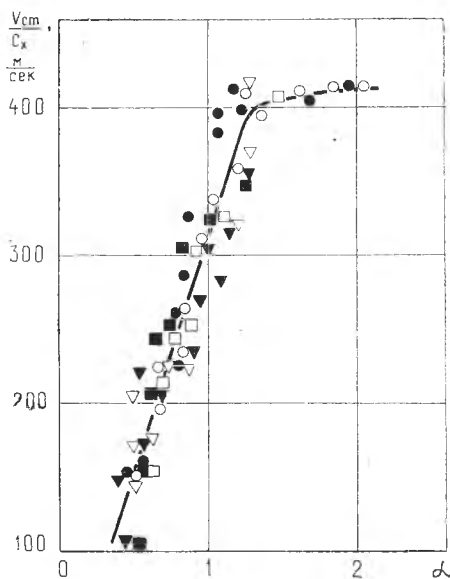


Рис. 3. Обобщенная граница устойчивого горения богатой смеси.

2. С ростом степени загромождения влияние формы стабилизатора на диапазон устойчивого горения уменьшается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика сжигания газа. Под ред. Иссерлина А. С. т. V, Л., «Наука», 1972.
2. Бовина Т. А. Исследование обмена между зоной рециркуляции за стабилизатором и внешним потоком и некоторые вопросы стабилизации пламени. В сб.: «Горение при пониженных давлениях и некоторые вопросы стабилизации пламени», М., изд. АН СССР, 1961.
3. Лонгвелл Дж. Стабилизация пламени телами плохообтекаемой формы и турбулентные пламена в каналах. В сб.: «Вопросы горения и детонационных волн». (Четвертый симпозиум (международный) по вопросам «Горения и детонационных волн»). М., Оборонгиз, 1958.
4. Rappeneau J., Crassin H. Etude des flammes stabilisees par des obstacles de revolution dans des ecoulements a grandes vitesses. «Office National d'Etudes et de Recherches Aeronautiques», 1957, Note Technique, N 41.
5. Лонгвелл Дж., Шеневи Дж., Кларк В. и Фрост Е. Устойчивость пламени в высокоскоростном газовом потоке с помощью препятствия. В сб.: «Вопросы горения», т. 1, М., ИЛ., 1953.
6. Winterfeld G. ON. Processes of turbulent Exchange behind flame holders. 10-ht Symposium (international) on Combustion, Cambridge, 1964.
7. Токарев В. В., Шайкин А. П. О влиянии турбулентности на процесс стабилизации диффузионного пламени. ИВУЗ. «Авиационная техника», 1974, № 2.
8. Lefebure A. H. Factors affecting freshmixture entrainment in bluff-body stabilised flames. «Combustion and Flame». N 3, v 10, 1966.
9. Сударев А. В., Маев В. А. Длина зоны отрыва за плохообтекаемым телом в ограниченном потоке. Инженерно-физический журнал, т. XXIII, 1972, № 2.
10. Силантьев Б. А. Экспериментальное исследование турбулентного обмена на «границе зоны отрыва». Прикладная механика и техническая физика, 1966, № 5.
11. Акылбаев Ж. С., Исатаев С. И., Тарасов С. Б. Структура течения в следе за цилиндром в канале. В сб.: «Вопросы общей и прикладной физики», Алма-Ата, «Наука», 1969.

**А. П. Комаров**

## **ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ТРАКТЕ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН**

### УСЛОВИНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$R_0$  — характерный радиус лопаточной машины, в долях которого выражаются все линейные размеры ее проточной части;

$l$  — отрезок прямоугольной образующей осесимметричной поверхности рассматриваемого сечения тракта, ограниченный его внешней и внутренней поверхностью;

$\bar{l} = \frac{l}{R_0}$  — относительная величина отрезка,  $l$ ;