

УДК 536.46

**Б.Г. МИНГАЗОВ, Д.Х. ШАРАФУТДИНОВ***Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Россия***ВЛИЯНИЕ АВТОТУРБУЛИЗАЦИИ НА СКОРОСТЬ ТУРБУЛЕНТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ**

Рассмотрено влияние автотурбулентности на скорость распространения пламени в турбулентном потоке. Предложены коэффициент автотурбуликации позволяющий обобщить экспериментальные данные и формула для определения турбулентной скорости распространения пламени.

**горение, автотурбуликация, турбулентная скорость распространения пламени, экспериментальный коэффициент**

Процесс горения в турбулентном потоке наиболее широко применяется на практике, в особенности в газотурбинных двигателях. Поэтому изучение закономерностей распространения пламени в турбулентном потоке остается до сих пор актуальным. Известно, что при моделировании основной характеристики – скорости турбулентного горения  $u_T$  – используются подходы, основанные на “поверхностном” представлении фронта пламени, в которых значения скорости турбулентного горения  $u_T$  определяется уравнениями К.И. Щелкина [1]

$$u_T = u_n + w'$$

или А.В. Талантова [2]

$$u_T = u_n + \frac{A \cdot w'}{\sqrt{\ln\left(1 + \frac{w'}{u_n}\right)}}$$

Скорость распространения пламени в турбулентном потоке определяется как скоростью пульсаций  $w'$ , так и нормальной скоростью горения  $u_n$ . С целью установления основных закономерностей влияния различных факторов на скорость турбулентного горения  $u_T$  проведены многочисленные экспериментальные исследования, в которых установлено влияние начальных температур, давлений, составов смеси. Известно, что приведенные уравнения не достаточно точно описывают экспериментальные резуль-

таты в области «богатых» и умеренно «бедных» составов топливоздушной смеси.

Ранее различными авторами было установлено, что в турбулентном потоке под действием температурной неравномерности при горении фронт пламени искривляется, и возникают дополнительные пульсации. Возникновение автотурбуликации за счет расширения смеси при горении было впервые рассмотрено Карловицем. Им на основе оценки доли энергии расширения смеси, которая не используется непосредственно для прироста средней скорости потока продуктов сгорания, получена следующая формула для определения величины пульсационной скорости, генерированной пламенем:

$$w'_a = \frac{\theta - 1}{\sqrt{3}} \cdot u_n,$$

где  $\theta = \frac{T_c}{T_o}$  – степень подогрева.

А.В. Талантовым [3] предложена следующая зависимость для пульсационной скорости, генерируемой пламенем:

$$w'_a = (\theta - 1) \cdot u_n.$$

Если принять, что в области  $w'/u_n < 10$  для расчета турбулентной скорости горения  $u_T$  справедливы уравнения К.И. Щелкина и А.В. Талантова, то учет влияния пульсаций, возникающих в пламени, возможно провести путем прибавления  $w'_a$ :

$$u_m = u_n + w' + w'_a = \theta \cdot u_n + w' ;$$

$$u_m = \theta \cdot u_n + \frac{A \cdot w'}{\sqrt{\ln\left(1 + \frac{w'}{u_n}\right)}} .$$

Для суждения о роли пульсационной скорости в распространении пламени представляет интерес проследить за величиной отношения прироста величины  $u_T$  от турбулизации потока, называемого коэффициентом эффективности действия пульсаций  $K_T$ . Это отношение будет иметь вид:

$$K_T = \frac{u_T - u_n}{w'}$$

Если представить данное отношение в функции от  $w'/u_n$ , то экспериментальные результаты, полученные для различных условий горения гомогенной смеси в турбулентном потоке можно показать в виде представленном на рис. 1.

Видно, что все значения  $K_T$  существенно различны для одинаковых величин  $w'$ , но при различных  $u_n$ . Такое различие в значениях  $K_T$  может быть объяснено тем, что в распространении пламени в турбулентном потоке принимает участие и турбулентность, генерируемая самим пламенем, помимо турбулентности существующей в потоке без горения

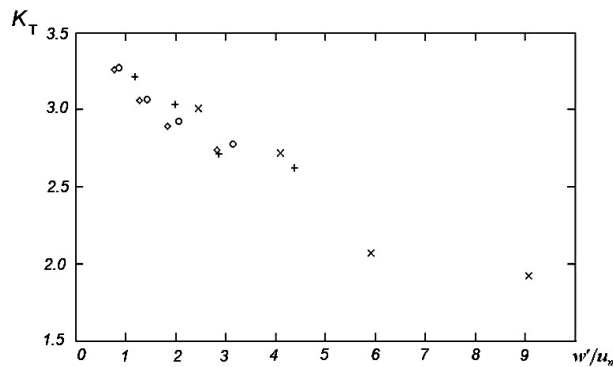


Рис. 1. Коэффициент эффективности ( $T_0 = 693$  К):  
 × –  $w' = 1,6$ ; + –  $w' = 2,5$ ; ○ –  $w' = 3,8$ ; ◇ –  $w' = 6$

С увеличением соотношения  $w'/u_n$  значение  $K_T$  уменьшается, что может быть объяснено уменьшением роли автотурбулизации с ростом  $w'$ . Поскольку турбулентность, генерируемая пламенем,

пропорциональна нормальной скорости распространения пламени  $u_n$ , то при постоянном значении  $u_n$  (т.е. при практически постоянном значении автотурбулизации) увеличении отношения  $w'/u_n$  приводит к тому, что при увеличивающейся турбулентности основного потока вклад в величину турбулентной скорости распространения пламени автотурбулизации уменьшается.

Однако при анализе закономерностей изменения величины  $u_T$  [2], можно заметить, что в области  $\alpha < 1$  существует большая разница в протекании расчетных и экспериментальных данных. Можно предположить, что этот факт вызван влиянием автотурбулизации фронта пламени возникающей из-за неравномерной теплопроводности и диффузии при горении очагов переобогащенных топливом и в соответствии с рис. 1 изменением соотношения  $w'/u_n$ .

Для определения роли автотурбулизации также можно проследить за относительной величиной прироста турбулентной скорости под влиянием автотурбулентности пропорциональной величинам нормальной скорости  $u_n$  и степени подогрева  $\theta$ :

$$K'_a = \frac{u_m - w'}{u_n \cdot (\theta - 1)}$$

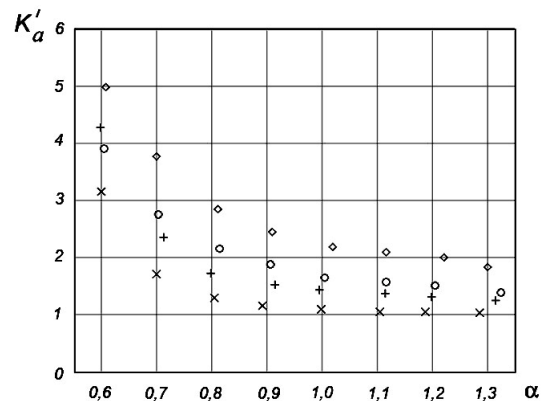


Рис. 2. Коэффициент  $K'_a$  ( $T_0 = 393$  К):  
 × –  $w' = 1,6$ ; + –  $w' = 2,5$ ; ○ –  $w' = 3,8$ ; ◇ –  $w' = 6$

Как видно из приведенного графика (рис. 2), коэффициент  $K'_a$  свидетельствует о сильном влиянии турбулентности генерированной в пламени в облас-

ти горения «богатых» смесей ( $\alpha < 1,0$ ). Горение таких смесей характеризуется большей неустойчивостью фронта пламени, что способствует генерации дополнительной турбулентности в особенности в области малых скоростей и турбулентности.

Кроме того, следует заметить, что помимо степени подогрева  $\theta$  на уровень автотурбуликации влияет также и начальная турбулентность в потоке  $w'$ , на которую накладывается начальная неравномерность потока (как по скорости движения и степени турбулентности, так и по локальному составу смеси), что приводит к неустойчивости фронта пламени и флуктуациям параметров в нем.

Для обобщения экспериментальных данных предлагается использовать коэффициент автотурбуликации представленный в следующем виде:

$$K_a = \frac{u_m - w'}{u_n \cdot \sqrt{w' \cdot (\theta - 1)}} = f(\alpha).$$

Как видно из рис. 3 коэффициент автотурбуликации позволяет достаточно полно обобщить экспериментальные данные. При этом наблюдается однозначная зависимость от коэффициента избытка воздуха, что говорит о правильном выборе критерия.

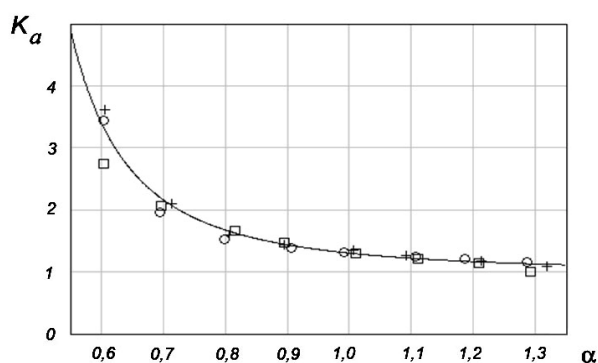


Рис. 3. Коэффициент автотурбуликации ( $T_0 = 393$  К):  
 $\times - w' = 1,6$ ;  $+- w' = 2,5$ ;  $\circ - w' = 3,8$ ;  $\diamond - w' = 6$

Обработка экспериментальных данных с помощью предложенного коэффициента позволяет обобщить полученные результаты в виде зависимости от коэффициента избытка воздуха:

$$K_a = k_0 \cdot \exp(k_1 \cdot \alpha^{-3}),$$

где  $k_0$  и  $k_1$  – экспериментальные коэффициенты, которые в наших экспериментах составили 1,51 и 0,373 соответственно.

На основании вышеизложенного можно получить формулу для расчета скорости турбулентного распространения пламени  $u_T$  в области значений коэффициента избытка воздуха  $0,6 \leq \alpha \leq 1,3$ :

$$u_T = K_a \cdot u_n \cdot \sqrt{w' \cdot (\theta - 1)} + w'.$$

Результаты сопоставления результатов расчета по предложенной формуле с экспериментальными данными показывают достаточную точность в описании протекания экспериментальной кривой.

## Выводы

1. Подтвержден факт влияния автотурбулентности на скорость распространения пламени в турбулентном потоке.
2. Получена зависимость для расчета скорости распространения пламени с учетом автотурбуликации.
3. Выявлена зависимость коэффициента влияния автотурбулентности на турбулентную скорость распространения пламени.

## Литература

1. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. – М.: АН СССР, 1963. – 325 с.
2. Ильяшенко К.И., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. – М.: Машиностроение, 1964. – 336 с.
3. Талантов А.В. Горение в потоке. – М.: Машиностроение, 1978. – 160 с.

*Поступила в редакцию 4.05.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Р.И. Адгамов, Казанский государственный технический университет им. А.Н.Туполева, Казань.