

УДК 621.3.002

**Б.Г. МИНГАЗОВ, ХАБЛУС АХМЕД**

*Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева (КАИ), Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД**

Рассмотрены вопросы, связанные с моделированием процесса сгорания топливовоздушной смеси в камерах сгорания ГТД. Предложен метод определения полноты сгорания топливовоздушной смеси на основе теории турбулентного горения. Получены расчетные зависимости изменения полноты сгорания температуры газа в камерах сгорания в различных режимах ее работы, проведено сопоставление с экспериментальными данными.

**одномерная модель камеры сгорания, поверхностная модель турбулентного горения, температура и полнота сгорания**

### **Введение**

Рабочий процесс в основных камерах сгорания (КС) протекает в условиях существенной неоднородности смеси как по фазе, так и по составу, т.е. имеет место неоднородное распределение топлива по объему жаровой трубы. Характерной особенностью основных КС является также то, что в ней осуществляется постепенный, ступенчатый подвод вторичного воздуха по длине зоны горения. Необходимость рассредоточенного подвода воздуха связана с тем, что обеспечение эффективного сгорания топлива, в особенности жидкого, возможно только при организации постепенного смешения топлива с воздухом. На основе уравнений баланса, приведенных в работе [1], были получены зависимости для определения состава смеси температуры газа, на основе которых были проведены расчеты полноты сгорания топлива, законом распределения воздуха по ее длине, а также режимными параметрами – давлением, температурой и расходом воздуха.

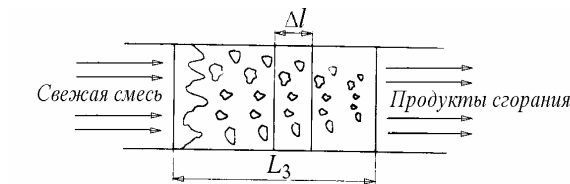
Существуют два широко применяемых метода приближенного описания процесса горения в камере – моделирование по скорости распространения пламени и моделирование реактором идеального смешения. В [2, 3] показано, что оба эти подхода

моделирования приводят после некоторых упрощений практически к равноценным критериям, называемым в литературе "параметром форсировки".

### **1. Модель камеры сгорания**

Предложенный зонный метод (разделение камеры по длине на ряд зон) и допущение, что в пределах каждой зоны приближенно происходит реагирование однородной смеси паров топлива с воздухом, поступившим в каждую зону из предыдущего участка и боковых отверстий жаровой трубы, позволяет избежать этих затруднений. Принимается, что в радиальном направлении пары топлива и воздух смешиваются достаточно быстро и процесс смесеобразования не является лимитирующим, в то же время состав смеси по длине камеры меняется ступенчато, от сечения к сечению каждой зоны, т.е. параметры на выходе зоны являются параметрами на выходе из предыдущей зоны. Фактически такое разделение объема жаровой трубы на  $n$  зон означает применение одномерной модели, которая позволяет проследить за изменением параметров потока и протеканием в них различных процессов в некоторый момент времени в осевом направлении. Такой подход позволяет применить основы теории турбулентного распространения пламени в пределах одной зоны.

Привлекательным в использовании теории турбулентного горения в расчетах КС является то, что определяющие параметры (интенсивность и масштаб турбулентности) позволяют дополнительно учитывать в расчетах влияние гидродинамических факторов на процессы сгорания смеси. В теории турбулентного горения при трактовке процесса выгорания топлива рассматривается отдельный усредненный объем смеси, который иногда называют "молекулой" смеси. Турбулентные пульсации выносят отдельные участки фронта пламени вперед в сторону свежей смеси. За время смешения направление пульсаций будет меняться и пламя может перекинуться на один из соседних молекул. Таким образом, распространение пламени обеспечивается эстафетным движением быстрейших точек. С этих позиций скорость распространения пламени в турбулентном потоке должна определяться как пульсациями, так и нормальной скоростью (рис. 1).



Продукты сгорания

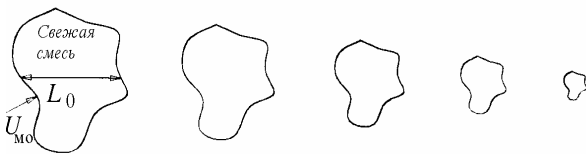


Рис. 1. Схема горения объемов свежей смеси

По утверждению А.В. Талантова [2], в зоне горения "молекула" сгорает с поверхности с определенной скоростью  $U_M$ . За малый промежуток времени  $dt$  сгорает малый объем  $dV$ , равный площади осредненной поверхности молекулы радиусом  $l$  и скоростью  $U_M$ :

$$dV = 4 \cdot \pi \cdot l^2 U_M dt. \quad (1)$$

Разделив это выражение на начальный объем, равный

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \cdot l_0^3,$$

получим

$$d \left( \frac{V}{V_0} \right) = 3 \frac{l^2}{l_0^3} U_M \cdot dt. \quad (2)$$

Из теории турбулентного распространения пламени известно, что текущий масштаб турбулентности определяется зависимостью

$$l = \frac{l_0}{W'} \left[ (U_H + W') e^{-\frac{t \cdot W'}{l_0}} - U_H \right], \quad (3)$$

а скорость турбулентного горения молекулы с поверхности определяется формулой

$$U_M = (U_H + W') e^{-\frac{t \cdot W'}{l_0}}. \quad (4)$$

Подставляя уравнения (3) и (4) в формулу (2), можно получить выражение для расчета полноты (доли) сгорания смеси паров топлива и воздуха:

$$\eta = \frac{3 \cdot l_0^3}{l_0^3 \cdot W'^3} \int_0^t \left( U_{M_0} l^{-\frac{t}{t_0}} \right)^2 U_{M_0} e^{-\frac{t}{t_0}} dt, \quad (5)$$

где  $U_{M_0} = U_M + W'$ .

После интегрирования выражения (5) можно получить уравнение для расчета полноты сгорания:

$$\eta = \frac{3U_{M_0}^3 t_0^3}{l_0^3} \left[ \frac{1}{3} \left( 1 - e^{-\frac{3t}{t_0}} \right) - \frac{U_H}{U_{M_0}} \left( 1 - e^{-\frac{2t}{t_0}} \right) + \frac{U_H^2}{U_{M_0}^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) \right], \quad (6)$$

где  $t$  – время пребывания молекулы в пределах зоны горения  $t = \Delta x / W$ ;  $t_0 = l_0 / W'$  – время существования пульсации;  $l_0, W'$  – масштаб и пульсационная скорость в расчетном сечении потока.

После подстановки этих параметров в уравнение

(6) можно получить

$$\eta = \frac{3U_{M0}^3}{W^3} \left\{ \frac{1}{3} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3\Delta x \cdot \varepsilon}{l_i}\right) \right] - \frac{U_H}{U_{M0}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\Delta x \cdot \varepsilon}{l_i}\right) \right] + \frac{U_H^2}{U_{M0}^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta x \cdot \varepsilon}{l_i}\right) \right] \right\}. \quad (7)$$

## 2. Анализ результатов и выводы

Из анализа приведенного аналитического выражения следует, что процесс сгорания зависит не только от кинетических факторов, за влияние которых отвечает нормальная скорость горения, но и учитывает гидродинамические условия, складывающиеся в потоке, что существенно повышает соответствие теоретических зависимостей реальным процессам. Таким образом, данная зависимость для расчета полноты сгорания позволяет более детально определять влияние тех или иных входных параметров на характеристики КС. В то же время решение данного уравнения возможно при условии определения характеристик газового потока в жаровой трубе.

На основе полученных зависимостей были проведены расчеты процессов в камерах сгорания различных ГТД. На рис. 3, 4 приведены данные по расчету изменения полноты сгорания, температуры газа по длине жаровой трубы. При разных температурах на входе в КС  $T_{BX}$  из анализа приведенных кривых следует, что Основное реагирование смеси происходит в первичной зоне горения, затем идет процесс разбавления газа вторичным воздухом и температура смеси падает. В то же время видно, что температура потока на входе в КС на процесс реагирования оказывает слабое влияние. Очевидно, что при использовании теории поверхностного горения влияние температуры через  $u_H$  учитывается недостаточно.

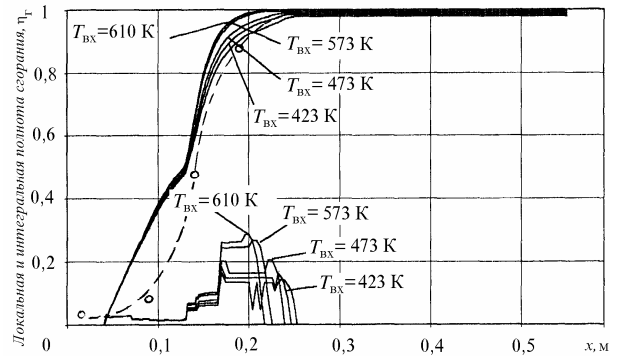


Рис. 2. Распределение полноты сгорания по длине жаровой трубы:  $\alpha_k = 6,5$ ;  $P_k^* = 0,1$  МПа, топливо – природный газ

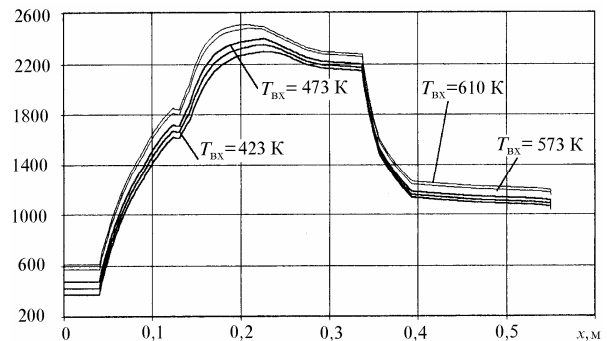


Рис. 3. Распределение температуры по длине жаровой трубы:  $\alpha_k = 6,5$ ;  $P_k^* = 0,1$  МПа, топливо – газ

С этой целью необходимо, в дальнейшем использовать в моделировании процесса горения в КС также и подходы, основанные на "объемном" представлении механизма горения в КС.

## Литература

1. Мингазов Б.Г. Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД. – Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2000. – 168 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория расчет прямиоточных камер сгорания. – М.: Машиностроение, 1964. – 306 с.

Поступила в редакцию 29.04.2004

**Рецензент:** проф. Р.А. Адгамов, Казанский государственный технический университет им А.Н. Туполева (КАИ), Казань.