

УДК 532.517.4 : 621.43.056

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Александров Ю.Б., ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,
г. Казань, Alexwischen@rambler.ru
Мингазов Б.Г., ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,
г. Казань, [BGMingazov@kai.ru](mailto:BG Mingazov@kai.ru)
Вафин И.И., ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,
г. Казань, 89274415294@mail.ru
Сулаиман А.И., ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,
г. Казань, Armin.wrya@mail.ru

Ключевые слова: камера сгорания, смешение потоков, неравномерность температурного поля, численное моделирование смешения.

Процесс смешения в жаровой трубе является весьма сложным и зависит от многочисленных факторов [1], в связи с чем получение ясной физической картины смешения потоков и тем более аналитических зависимостей весьма затруднительно. Рассмотрению процессов смешения струй с потоком посвящено значительное число исследований (Лефевр А., Спиридонова, Григорьев А.В. и др.). Однако в них, как правило, отсутствует привязка к условиям протекания процессов в камере сгорания и учета многочисленных особенностей, присущих течению закрученного потока в жаровой трубе. В связи с поставленной целью задачей данной работы является получение аналитических зависимостей позволяющих определять закономерности процессов смешения струй с потоком в камере сгорания ГТД.

Известно, что механизмы переноса тепла и примесей в струе одинаковы. В результате этого профили избыточной концентрации примесей в струе должны быть подобны профилям избыточной температуры. Отсюда следует, что при получении закономерностей формирования температурных полей возможно использование зависимости, полученные для процессов смешения. Считается, что процесс смешения в жаровой трубе определяется в значительной мере газодинамикой течения, в частности взаимодействием струй и потока. Процесс смешения системы струй протекает не только в результате турбулентного обмена, но и вследствие активного взаимодействия аэродинамических экранов, создаваемых этими струями в потоке.

Следовательно, процесс смешения в жаровой трубе можно условно подразделить на «турбулентное» и «струйное» смешение вторичного воздуха с потоком [2]. На основании сказанного можно составить уравнение баланса расхода воздуха, смешивающегося с газовым потоком по длине жаровой трубы в следующем виде:

$$G_{\tau i} = G_{\tau i-1} + \Delta G_{\text{в.т}i} + \Delta G_{\text{в.с}i}, \quad (1)$$

где $G_{\tau i-1}$ – газ, поступивший из предыдущей зоны; $\Delta G_{\text{в.т}i}$ – воздух, поступивший в зону горения в результате «турбулентного» смешения; $\Delta G_{\text{в.с}i}$ – воздух, поступивший в зону горения в результате «струйного» смешения.

С целью получения аналитических зависимостей введем понятия коэффициентов смешения: $m_{\tau i} = G_{\text{в.т}i} / G_{\tau i-1}$ – коэффициент «турбулентного» смешения, характеризующий смешение вторичного воздуха с газовым потоком в результате турбулентного массообмена; $m_{\text{с}i} = G_{\text{в.с}i} / G_{\tau i-1}$ – коэффициент «струйного» смешения, характеризующий смешение вторичного воздуха в результате проникновения струй в сносящий поток.

Уравнение баланса расхода газа (1) запишется в следующем виде:

$$G_{\tau i} = G_{\tau i-1} (1 + m_{\tau i} + m_{\text{с}i}). \quad (2)$$

Как видно из приведенного уравнения (2), для определения количества воздуха, эжектируемого в зону горения, в i -м сечении необходимо определить коэффициенты $m_{\text{с}i}$, $m_{\tau i}$, характеризующие процессы смешения вторичного воздуха с набегающим газовым потоком в жаровой трубе по различным схемам взаимодействия. При аналитическом определении выражений для вычисления $m_{\text{с}i}$, $m_{\tau i}$ можно использовать подходы, имеющиеся в литературе.

Для перспективных двигателей, таких как НК-38СТ, ПД-14 имеющих высокую степень раскрытия фронтного устройства, целесообразно рассматривать механизм смешения, связанный с турбулентной диффузией.

При определении $m_{\tau i}$, зависящее в основном, от процесса турбулентного массообмена, можно использовать уравнение турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{D_{\tau}}{W} \left(\frac{1}{2} \frac{df}{dr} + \frac{d^2 f}{dr^2} \right),$$

частным решением которого является, уравнение для кольцевого источника газа:

$$f(x, r) = \frac{G_{\tau}}{G_{\text{в}}} \frac{R_{\text{ТР}}^2}{R_0^2} k \left[I_0 \left(2k \frac{r}{R_0} \right) \right] \exp - k \left(1 + \frac{r^2}{R_0^2} \right), \quad (3)$$

где f – местное соотношение газ-воздух; $k = (R_0^2 W_i) / (4D_{\tau} x)$ – безразмерный комплекс; r – текущий радиус струи; β – коэффициент, учитывающий

особенности конструкции завихрителя; D_τ – коэффициент турбулентной диффузии, записанное как уравнение $D_\tau = 0.003 (1 + \beta^2 \text{tg}^2 \varphi)^{0.5} W R_\tau$ можно применить для случая истечения закрученного потока из фронтного устройства, которое позволяет проводить расчет смешения закрученного потока с вторичным воздухом в жаровой трубе; R_τ – радиус трубы.

Так как m является отношением расходов эжектируемого воздуха и газа выходящего из фронтного устройства, то $m_1 = 1/f$, тогда используя уравнение для кольцевого источника (3) можно получить:

$$m(x, r) = A \frac{T_\Gamma}{T_0} \frac{W_0}{W_\Gamma} \frac{1}{k} \frac{\exp k \left(1 + \frac{r^2}{R_{\Phi P}^2} \right)}{I_0 \left(2k \frac{r}{R_{\Phi P}} \right)} \frac{\Delta F_i}{F_\Sigma}, \quad (4)$$

где F_Σ – суммарная площадь всех отверстий; W_0 , W_Γ – скорости струй воздуха и газового потока в рассматриваемом сечении; $\Delta F_i(x) = F_i(x) - F_{\Phi P}$; A – коэффициент пропорциональности; W_0 , W_Γ и T_0 , T_Γ скорости и соответственно температуры струй воздуха и газового потока в рассматриваемом сечении; в качестве радиуса кольцевого источника принимается радиус фронтного устройства $R_{\Phi P}$.

Согласно допущениям, комплекс k примет вид:

$$k = R_{\Phi P}^2 / \left(0,003 (1 + \beta \text{tg}^2 \phi)^{0.5} R_\tau x \right).$$

В расчетах смесеобразования представляет интерес смешение по оси камеры сгорания, тогда можно принять, что $r = 0$. В этом случае уравнение (4) примет вид:

$$m_\tau = A \frac{T_\Gamma}{T_0} \frac{W_0}{W_\Gamma} \frac{\Delta F_i}{F_\Sigma} \frac{1}{k} e^k. \quad (5)$$

Для удобства проведения анализа, уравнения баланса (2) можно записать в относительном виде, поделив его на суммарный расход G_Σ .

$$\frac{G_{\tau i}}{G_\Sigma} = \frac{G_{\tau i-1}}{G_\Sigma} (1 + m_{\tau i}), \quad \text{для } i = 0 \text{ переписывается как } \frac{G_\tau}{G_\Sigma} = \frac{G_{\Phi P}}{G_\Sigma} (1 + m_\tau). \quad (6)$$

Используя формулу (5) и (6), можно рассчитать динамику турбулентного смешения по оси камеры сгорания, а температурную неравномерность определить по формуле:

$$\Theta = 1 - \frac{G_\tau}{G_\Sigma} = 1 - \frac{F_{\Phi P}}{F_\Sigma} (1 + m_\tau). \quad (7)$$

Изложенные аналитические алгоритмы вошли в основу компьютерной программы «Камера», что позволило определять влияние различных

факторов на радиальную неравномерность. Расчетные данные неравномерности полей температур верифицировались с экспериментальными данными и были получены удовлетворительные согласования результатов. Проведенные исследования позволили создать методику расчета неравномерности полей температур на выходе из камер сгорания ГТД.

Список литературы

1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
2. *Мингазов Б.Г.* Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет: учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 220 с.

УДК 621.45.056:66

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАНЫХ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Кныш Ю.А., Самарский университет, г. Самара, knysh194@mail.ru

Ключевые слова: микровихревые течения, каталитические покрытия, массовые силы, загрязняющие вещества, лазерное спекание, тепло – массоперенос.

В работе экспериментально обоснована новая технология организации процессов горения предварительно перемешанных газоздушных смесей. Горение организовано в системе взаимно пересекающихся микровихревых структур, ограниченных с трех сторон стенками из жаростойкого материала, а с четвертой стороны открытого промежутка, где осуществляется генерация вихревых структур благодаря интенсивному турбулентному взаимодействию взаимно пересекающихся струй. Дополнительная инициация горения обеспечивается покрытием стенок жаростойкого материала каталитически активными композициями. Высокий уровень тепло-массопереноса в микровихревых структурах обеспечивается действием массовых сил, развивающихся в сильно закрученных потоках.

В работах [1,2] дано теоретическое и экспериментальное обоснование принципа сжигания топлива в условиях «избыточной энтальпии» на примере горения газовой реагирующей смеси в твердом пористом каркасе. Ввиду высокой теплопроводности материала каркаса тепловые