

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЗАПУСКА КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Саркисов А.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д.,
Сигалов Ю.В., Митрофанов В.А.

*Государственное унитарное предприятие
«Завод имени В.Я. Клымова», г. Санкт-Петербург*

Важнейшей задачей при создании камеры сгорания газотурбинного двигателя является обеспечение воспламенения топливовоздушной смеси в различных высотно-климатических условиях. Особенно актуально решение проблем запуска для авиационных и транспортных двигателей.

В настоящее время доводка камеры сгорания по обеспечению запуска осуществляется дорогостоящим методом проб и ошибок с привлечением специального оборудования (термобарокамеры) и испытания большого количества вариантов.

Рассмотрим воспламенение топливовоздушной смеси в движущемся потоке с позиций тепловой теории. Ускорение реакции первоначально происходит в малом объеме и затем распространяется на весь объем камеры. Инициирование воспламенения смеси происходит за счет интенсивного нагревания небольшого объема теплом от свечи зажигания.

Согласно тепловой теории:

$$q_{хим} \geq q_{нагр}, \quad (1)$$

где $q_{хим}$ – количество тепла, выделяющегося в единицу времени в процессе химической реакции в единице объема начального очага горения; $q_{нагр}$ – количество тепла, идущее на нагрев единицы объема топливо-воздушной смеси в начальном очаге горения и уносимое продуктами реакции в единицу времени.

Рассмотрим каждую из составляющих неравенства (1).

Скорость выделения тепла в единице начального объема в результате химической реакции:

$$q_{хим} = W_p \cdot H_M,$$

где: W_p – массовая скорость химической реакции; H_M – количество тепла, выделяющееся при сгорании смеси.

$$W_p' = B P_k^m e^{-E/RT},$$

где B – постоянная, зависящая от состава смеси; P_k – давление воздуха; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; m – показатель степени, характеризующий влияние давления на скорость химической реакции; T – температура газа;

$$T = f(T_k, H_u, E_{св}),$$

$$H_M = \eta \cdot H_u / (1 + \alpha_M L_0),$$

где η – коэффициент полноты сгорания; H_u – низшая теплота сгорания топлива; α_M – коэффициент избытка воздуха в рассматриваемом малом объеме топливовоздушной смеси; L_0 – теоретическое количество окислителя, необходимое для сжигания одного килограмма топлива; T_k – температура воздуха; $E_{св} = (CU^2)/2$ – энергия разряда, сосредоточенная в конденсаторе; C – емкость конденсатора; U – напряжение.

Полнота сгорания топлива существенно зависит от:

- температуры T_k и давления P_k воздуха на входе в камеру сгорания;
- качества распыливания топлива, характеризуемого медианным диаметром каплей d_m , который определяется геометрией форсунки и значениями критериев Вебера и Лалласа. Рассчитывается по формулам, приведенным в [1];

- доли воздуха, поступающего в зону горения, которая определяется параметром $\bar{\mu}F_3 = \mu F_3 / \sum \mu F_{ож}$, где μF_3 – эффективная площадь завихрителя, $\sum \mu F_{ож}$ – эффективная площадь всех отверстий жаровой трубы;

- интенсивности процессов турбулентности и теплообмена топливных и воздушных потоков, которые характеризуются конструктивным параметром $F_{жс} / \sum \mu F_{ож}$, где $F_{жс}$ – площадь поперечного сечения жаровой трубы.

Таким образом, уравнение $q_{хим}$ может быть представлено в виде зависимости:

$$q_{хим} = f(P_k, T_k, E_{св}, H_u / (1 + \alpha_M L_0), d_m, \bar{\mu}F_3, F_{жс} / \sum \mu F_{ож}). \quad (2)$$

Значения E и R для жидких углеродных топлив, применяемых в ГТД, постоянны.

Количество тепла, уносимое движущимся потоком из элементарного объема, равно:

$$q_{нагр} = \frac{\Delta G}{\Delta V} C_p (T - T_k),$$

где ΔG – расход газа через объем очага горения ΔV ; C_p – теплоемкость газа, принимается постоянной

С учетом вышеизложенного отводимое из очага тепло может быть представлено в функциональном виде:

$$q_{нагр} = f\left(\frac{\Delta G}{\Delta V}, T_k, E_{св}, H_u / (1 + \alpha_{мL_0}), d_m, \bar{\mu}F_3, F_{жс} / \sum \mu F_{ожс}\right). \quad (3)$$

Переходя от объема начального очага горения к запуску камеры сгорания, с учетом уравнений (2) и (3), запишем основные параметры, определяющие воспламенение топливовоздушной смеси в условиях непосредственного розжига:

$$E_{св}, P_k, T_k, H_u / (1 + \alpha_{ксL_0}), d_m, \bar{\mu}F_3, F_{жс} / \sum \mu F_{ожс}, \frac{G_s}{V_x}.$$

Для решения неравенства (1) в виде зависимостей от указанных параметров используем методы множественной корреляции [2] с замсой переменных в линейных уравнениях регрессии логарифмами их величин.

При регрессионном анализе использованы многочисленные экспериментальные материалы «Завода имени В.Я. Климова» по исследованию полноразмерных камер сгорания и моделей на натуральных режимах на автономном стенде в термобарокамере.

Объектами испытаний явились камеры сгорания экспериментальных и серийных двигателей: прямоточные (ТВЗ-117, РД-33 и др.), противоточные (ГТД-1250, ТВ7-117, стационарный двигатель для электростанций ГТЭ-1,5 и др.) одиночные (ГТД-350) с завихрительными, аэрационными и микрофакельными фронтowymi устройствами. Конструктивные схемы исследованных фронтowych устройств показаны на рис.1.

Испытания проводились на керосине, дизельном летнем, зимнем и арктическом топливе (H_u – постоянная), без вдува и со вдувом вспомогательного

воздуха во второй контур форсунок с перепадом давления 0,02-0,3 МПа. Воспламенение производилось от свечей поверхностного и кумулятивного разряда с частотой разрядных импульсов от 2 до 25 Гц.

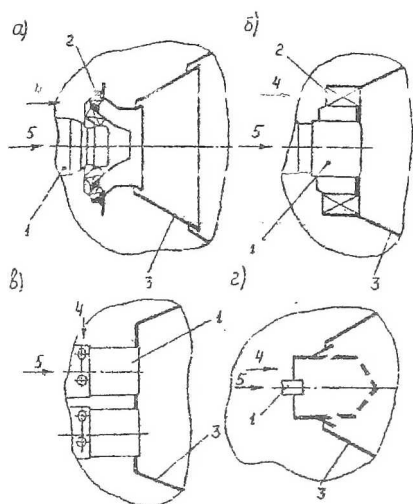


Рис. 1. Конструктивные схемы фронтных устройств:

- а) аэрационного типа;
 б) завихрительное;
 в) микрофакельное,
 г) с предварительным смешением;

- 1 – топливная форсунка,
 2 – завихритель,
 3 – жаровая труба,
 4 – воздух,
 5 – топливо

В результате решения неравенство (1) после преобразований принимает вид:

$$\frac{E_{ca}^k \left(\frac{V_{\kappa}}{G_a} \right)^{\ell} \exp \left(C \frac{F_{\kappa}}{\Sigma \mu F_{\text{ож}}} \right)}{\exp(a \cdot d_{\kappa}) \exp(b \cdot \mu F_3)} \geq A \frac{(1 + \alpha_{\kappa} L_o)^n}{\left(\frac{P}{0,1} \right)^{1,8} \exp \left(\frac{T_{\kappa}}{288} \right)}, \quad (4)$$

где k, ℓ, C, a, b, A, n – эмпирические коэффициенты^{*)}.

Критериальное неравенство (4) определяет необходимые и достаточные требования к конструкции, обеспечивающие запуск камеры сгорания в различных высотно-климатических условиях.

Левая часть неравенства, обозначенная K_1 , характеризует особенности конструкции камеры сгорания и их влияние на высотность запуска. Чем больше значение K_1 , тем на большей высоте и при более низкой температуре воздуха обеспечивается запуск двигателя.

^{*)} Все эмпирические коэффициенты хранятся в банке данных ОКБ «Завода имени В.Я. Климova».

Правая часть неравенства, обозначенная K_2 , характеризует режим запуска. Количественная оценка применения кислорода на запуске при подводе его в очаг воспламенения может быть осуществлена величиной L_0 в выражении K_2 . Запуск без заброса температуры газа на выходе из камеры сгорания происходит при значениях коэффициента избытка воздуха $\alpha_{кс} > 2,5$. Если $\alpha_{кс} < 2$ (но не менее $\alpha = 1$), для предотвращения прогаров концов рабочих лопаток турбины на запуске необходимо обеспечить резкий сброс давления топлива после его воспламенения путем соответствующих мероприятий в системе регулирования двигателя.

Неравенство (4) апробировано в следующем диапазоне режимных и конструктивных параметров: $P = 0,0227 \dots 0,1$ МПа ($H = 0 \dots 12$ км); $T_k = 223 \dots 296$ К; $G_в = 0,181 \dots 2,6$ кг/с; $\alpha_{кс} = 1 \dots 1,5$; $E_{св} = 0,3 \dots 8$ Дж; $V_{жс} = 0,008 \dots 0,0405$ м³; $\bar{\mu}F_3 = 0,044 \dots 0,44$; $F_{жс} / \sum \mu F_{ожс} = 5,61 \dots 11,4$, миделевая скорость в жаровой трубе изменялась в пределах $4,7 \dots 12$ м/с.

Анализируя левую часть неравенства, отметим, что конструктивные параметры $\bar{\mu}F_3$ и $F_{жс} / \sum \mu F_{ожс}$ для обеспечения запуска не могут изменяться в широких пределах, т.к. они имеют оптимальные значения из условий обеспечения минимальной неравномерности поля температур [3] и минимальных выбросов оксидов азота NO_x , монооксидов углерода CO , несгоревших углеводородов HC и минимального недожега топлива на рабочих режимах [4].

Параметр $V_{жс} / G_в$ характеризует время пребывания смеси в камере сгорания – чем его значение больше, тем надежнее запуск.

Основными параметрами, с помощью которых могут быть достигнуты высокие показатели высотности запуска, являются энергия разряда $E_{св}$ и средний диаметр капель распыливания топлива d_m . Максимальное значение $E_{св}$ на серийных отечественных двигателях достигает 6,5 Джоулей. За рубежом эта величина составляет 16 Джоулей. Повышение энергии разряда свечи является существенным резервом улучшения запуска двигателей.

Эффективным средством снижения диаметра капли d_m является распыливание топлива с помощью воздушного потока. Так, подача воздуха от воздушного стартера во второй контур центробежной топливной форсунки

уменьшает диаметр капли в 10 раз при перепаде давления 0,015 МПа и температуре топлива (-40°C).

На рис.2 иллюстрируются возможности улучшения высотности запуска на примере современного двигателя РД-33 для истребителя МиГ-29. По оси ординат отложена высота полета, а по оси абсцисс – варианты конструктивного исполнения.

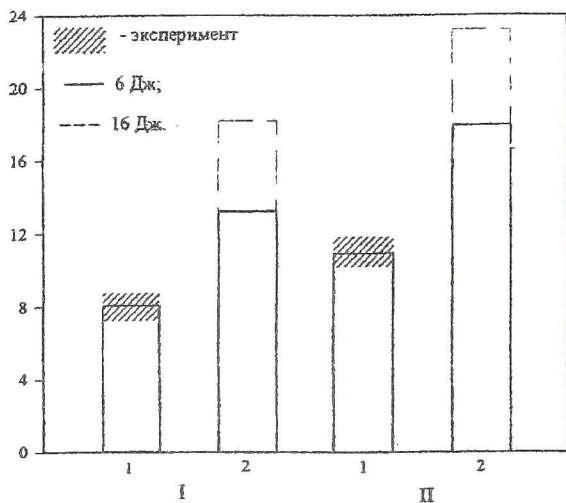


Рис.2 Диаграмма высотности запуска ГТД (Расчет по формуле 4):

I – без кислорода; II – с кислородом;

1 – механический распыл; 2 – воздушный распыл

Как видно из диаграммы, запуск двигателя без кислорода осуществляется до 8 км. Применение воздушного распыла повышает высотность запуска до 13,5 км. Дополнительное использование свечи с энергией разряда 16 джоулей повышает высоту запуска до 18 км.

Запуск с подводом кислорода реализуется на серийном двигателе до 11 км, а с применением аналогичных мероприятий высота запуска составляет 22 км.

В результате выполненной работы получены количественные соотношения, отражающие закономерности процесса запуска камеры сгорания газотурбинного двигателя в высотно-климатических условиях, позволяющие существенно сократить время и средства на доводку. Разработанное критериальное условие запуска применяется в математической модели процессов в камере сгорания при ее автоматизированном проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.
3. Конструкция, теория и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей. Учебное пособие. Рудаков О.А., Саркисов А.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В. Под редакцией д.т.н., проф. Саркисова А.А.. СПб: С-Петербургский гос.техн.ун-т, 1993. – 170 с.
4. Саркисов А.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В., Митрофанов В.А. Теория и расчет образования вредных выбросов в камерах сгорания ГТД. // Промышленная теплотехника. 1999. № 5.