

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ В ГТД

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

*Государственное унитарное предприятие
«Завод им. В.Я. Климова», г. Санкт-Петербург*

Поддержание устойчивого процесса горения на переходных режимах работы при резком обеднении смеси является одной из главных задач при создании камер сгорания авиационных, транспортных и стационарных ГТД. Как показывает практика, мероприятия по снижению эмиссии оксидов азота в большинстве случаев приводят к резкому сужению диапазона устойчивой работы камеры сгорания. Отсутствие работоспособных аналитических зависимостей, учитывающих влияние режимных и конструктивных параметров камеры сгорания на ее срывные характеристики, требует проведения большого количества дорогостоящих испытаний на специальных стендах, имитирующих реальные режимы работы двигателя. Поэтому актуальной задачей является разработка обобщенной зависимости, связывающей геометрию проточной части камеры сгорания и режимы ее работы с величиной коэффициента избытка воздуха при срыве горения.

Рассмотрим уравнение баланса тепла для движущегося потока газа в дифференциальной форме:

$$\frac{dG}{dV} dT = \frac{\lambda}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{H_m}{c_p} W_p, \quad (1)$$

где: dG – расход газа через элементарный объем dV ; λ – коэффициент теплопроводности; dT – приращение температуры газа; W_p – массовая скорость химической реакции; H_m – количество тепла, выделяющегося при сгорании смеси в элементарном объеме.

Левая часть уравнения (1) – количество тепла, уносимого движущимся потоком из элементарного объема, а правая – количество тепла, выделившегося в элементарном объеме в результате химической реакции и поступившего в этот объем за счет теплопроводности.

Массовая скорость химической реакции для углеводородных топлив

является функцией следующих параметров: температуры воздуха T_k , коэффициента избытка воздуха в рассматриваемом элементарном объеме α_m и величины давления воздуха P_k [1].

Уровень местных температур, поддерживающих процесс горения, характеризуется безразмерными конструктивными комплексами, как показано в работе [2]:

отношением площади жаровой трубы в миделевом сечении и суммарной эффективной площади ее отверстий $\frac{F_{жк}}{\sum \mu F_{ож}}$;

интенсивностью крутки воздушного потока на выходе из завихрителя, как функции ее геометрической характеристики - $\bar{W} = f(A)$, где A – геометрическая характеристика завихрителя;

относительной пропускной способностью завихрителя фронтального устройства - $\overline{\mu F_3}$, представляющей собой отношение эффективной площади завихрителя фронтального устройства к суммарной эффективной площади всех отверстий жаровой трубы

$$\overline{\mu F_3} = \frac{\mu F_3}{\sum \mu F_{ож}}$$

Параметр $\overline{\mu F_3}$ определяет величину коэффициента избытка воздуха в элементарном объеме при заданном коэффициенте избытка воздуха на выходе из камеры сгорания $\alpha_{кс}$.

Произведем анализ величин, входящих в левую часть уравнения (1):

$$T = f(T_k, H_m, \alpha_m).$$

$dG = \rho W \cdot dF$; где W – характерная скорость потока, в качестве которой принята скорость воздуха в отверстиях жаровой трубы (скорость на выходе из завихрителя фронтального устройства), определяющая процессы стабилизации пламени, ρ – плотность воздуха;

$$H_m = \frac{H_u}{1 + L_o \alpha_m}, \quad H_u \text{ – низшая теплота сгорания топлива, } L_o \text{ – тере-}$$

тическое количество окислителя, необходимое для сжигания одного килограмма топлива.

Тогда $\frac{dG}{dV} = \frac{\rho W \cdot dF}{dV} = \frac{\rho W}{d\ell}$, где $d\ell$ – величина, имеющая порядок

тепловой ширины зоны горения $\frac{\lambda}{c_p \rho U_n}$, где U_n – нормальная скорость распространения пламени [4]. Для приведения к безразмерному виду выразим скорость через коэффициент скорости $\lambda_{ож}$:

$$\frac{dG}{dV} = f(\lambda_{ож}, P_k, T_k); C_p, \lambda = \text{const}.$$

Исходя из вышеизложенного, представим решение дифференциального уравнения (1) устойчивости горения при максимальном обеднении смеси α_{kc}^{\max} в форме:

$$\varphi(P_k, T_k, \alpha_{kc}^{\max}, \frac{F_{эс}}{\sum \mu F_{ож}}, \overline{\mu F_3}, \overline{W}, \lambda_{ож}) = 0. \quad (2)$$

Для определения коэффициента избытка воздуха на выходе из камеры сгорания при срыве пламени α_{kc}^{\max} используем методы множественной корреляции [5] с заменой переменных в линейных уравнениях регрессии их логарифмами, в сочетании с методом последовательного исключения переменных (метод Брандона) и определения дискриминантных функций [6].

При регрессионном анализе использованы экспериментальные данные “Завода имени В.Я.Климова” по исследованию полноразмерных камер сгорания и моделей на натуральных и модельных режимах на автономных стендах.

Объектами испытаний явились камеры сгорания экспериментальных и серийных двигателей: прямоточные (ТВ2-117, ТВ3-117, РД-33 и др.), противоточные (ГТД-1250, ТВ7-117, стационарные двигатели для электростанций), камеры сгорания с вращающейся форсункой ГТД-550, ГТЭ-117 одиночные (ГТД-350) с завихрительными, аэрационными и микрофакельными фронтowymi устройствами [1].

В результате получена формула:

$$\alpha_{kc}^{\max} = A \left(\frac{P_k}{0,1} \right)^m \exp \left(a \frac{T_k}{288} \right) \times \\ \times \left\{ a_1 \exp \left(-a_2 \frac{F_{эс}}{\sum \mu F_{ож}} \right) - a_3 \exp \left(-a_4 \frac{F_{эс}}{\sum \mu F_{ож}} \right) + 1 \right\} \times \\ \times \exp(v \overline{W}) \exp(-v_1 \mu \overline{F_3}) / \left[\exp(c \lambda_{ож}^2 - c_1 \lambda_{ож}) \right], \quad (3)$$

где A, a, v, \dots, c, c_1 – эмпирические коэффициенты (Все эмпирические коэффи-

циенты хранятся в банке данных ОКБ «Завода им. В.Я. Климова».)

Уравнение (3) апробировано в следующем диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров:

$$P_k = 0,2 \dots 1,68 \text{ МПа}; \quad T_k = 373 \dots 678 \text{ К}; \quad \lambda_{\text{ожк}} = 0,14 \dots 0,25;$$

$$\frac{F_{\text{эс}}}{\sum \mu F_{\text{ожк}}} = 2,5 \dots 11,4; \quad \overline{\mu F_3} = 0,044 \dots 0,36; \quad \overline{W} = 0 \dots 1,55.$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных представлено на рис. 1, откуда следует их удовлетворительная сходимость.

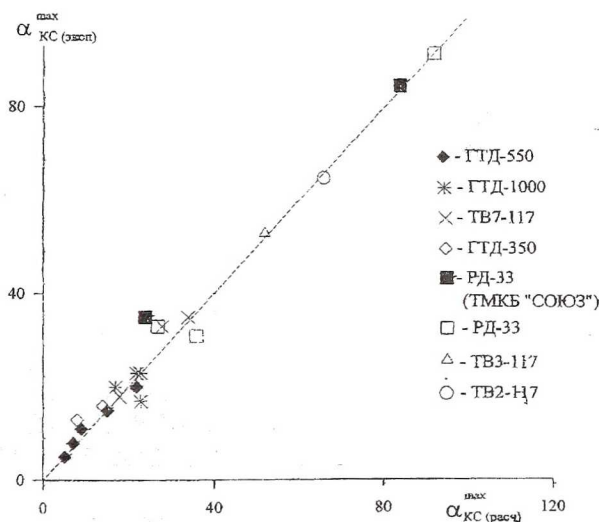


Рис. 1. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных

Таким образом, в результате обобщения многочисленных экспериментальных исследований, получено количественное соотношение, связывающее величины термодинамических параметров и безразмерных геометрических комплексов камеры сгорания с коэффициентом избытка воздуха при срыве горения. Указанная зависимость входит в математическую модель камеры сгорания и используется при ее автоматизированном проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка критериев запуска камер сгорания ГТД. / Саркисов А.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В., Митрофанов В.А. // Вестн. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1999г.-С.177-183.
2. 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.
3. Конструкция, теория и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей / Рудаков О.А., Саркисов А.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В.// Учебное пособие. под ред. д.т.н. проф.Саркисова А.А. СПб: С.-Петербургский гос.техн.ун-т, 1993. –170 с.
4. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Волынский М.С., Белый С.А., Беспалов И.В. и др.; Под ред. Раушенбаха Б.В. и др. -М.: Машиностроение, 1964
5. Ахиазарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии -М.: Высшая школа, 1978. –319 с.
6. Длин А.М. Факторный анализ в производстве. -М.: Статистика, 1975. -328 с.

УДК 621.43.056

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ РУРГАЗА

Сударев А.В., Виноградов Е.Д., Захаров Ю.И.

Научно-производственное предприятие «ЭСТ», г. С.-Петербург

1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ

Улучшение экологических характеристик стало в последние годы одним из основных направлений развития и совершенствования газотурбинных двигателей, наиболее широко использующихся в качестве привода нагнетателей природного газа на магистральных газопроводах. Задача экологической модернизации камер сгорания газовых турбин, находящихся в эксплуатации, принципиально отличается от задачи создания новых малотоксичных ГТУ.