

3. Раушенбах Б.В. и др. Физические основы процесса горения в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение. 1964. – С. 525.

УДК 621.438

ОПТИМАЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СУММАРНОЙ ПЛОЩАДИ ОТВЕРСТИЙ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Митрофанов В.А., Рудаков О.А., Сигалов Ю.В.

ФГУП «Завод имени В.Я. Климова», г. Санкт-Петербург

Теоретические исследования [1] и обобщения результатов испытаний камер сгорания газотурбинных двигателей различных схем и размерностей [2] показывают, что существует значение геометрического критерия камеры сгорания $\frac{F_{жс}}{\sum \mu \cdot F_{ож}}$, обеспечивающее, при прочих равных условиях, максимальную величину коэффициента полноты выгорания топлива. Здесь: $F_{жс}$ - площадь поперечного сечения жаровой трубы, $\sum \mu \cdot F_{ож}$ - суммарная эффективная площадь всех отверстий в жаровой трубе.

Параметр $\frac{F_{жс}}{\sum \mu \cdot F_{ож}}$ определяет также потери полного давления и коэффициенты окружной и радиальной неравномерности поля температуры газа на выходе из камеры сгорания.

Значения коэффициента полноты сгорания топлива и потерь полного давления в камере сгорания оказывают влияние на экономичность двигательной установки в целом, характеризуемой величиной эффективного коэффициента полезного действия цикла η_g , выражение для которого, с учетом потерь полного давления в камере сгорания, отборов воздуха, коэффициента полноты выгорания топлива имеет вид [3]:

$$\eta_c = \frac{\eta_{kc} \cdot \frac{\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_c} \left[\frac{\theta \cdot \eta_p \cdot \eta_c \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_k^{\frac{k-1}{k}} \sigma_{kc}^{\frac{k-1}{k}}} \right)}{\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1} \cdot \frac{1}{(1 + q_T) \cdot (1 - \delta_{omb})} \right]}{\left[\theta - \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c} - 1 \right]}$$

где η_c , η_p коэффициенты полезного действия процессов сжатия в компрессоре и во входном устройстве и расширения в турбине и в выходном устройстве; π_k и θ – степень повышения давления воздуха в компрессоре и степень повышения температуры в двигателе; σ_{kc} – коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания; $q_T = \frac{1}{\alpha_{kc} \cdot L_o}$; α_{kc} – коэффициент избытка воздуха в камере сгорания, L_o – количество воздуха, необходимое для окисления 1 кг топлива; δ_{omb} – доля воздуха, отбираемого за компрессором на охлаждение турбины и не проходящего через сопловой аппарат; η_{kc} коэффициент полноты сгорания топлива в камере сгорания.

Для высокотемпературного двигателя с охлаждаемой турбиной количество воздуха, отбираемого за компрессором, зависит от величины коэффициента окружной неравномерности поля температуры газа на выходе из камеры сгорания:

$$\delta_{omb} = f(\theta_{max}), \quad (1)$$

где θ_{max} – коэффициент окружной неравномерности поля температуры газа на выходе из камеры сгорания:

$$\theta_{max} = \frac{T_{max} - T_k}{T_z - T_k},$$

где T_{\max} – максимальная величина местной температуры газа на выходе из камеры сгорания; T_z – средняя величина температуры газа на выходе из камеры сгорания; T_k – температура воздуха на входе в камеру сгорания (равна температуре воздуха на выходе из компрессора).

Функциональная зависимость (1) устанавливается с помощью эмпирических расчетных соотношений [3]:

$$\bar{G}_{в\ кс\ охл} = a u_{лс}^m;$$

$$\bar{G}_{в\ кр\ охл} = a u_{лр}^m,$$

где $\bar{G}_{в\ кс\ охл}$ – относительный расход воздуха на конвективное охлаждение сопловых лопаток первой ступени турбины:

$$\bar{G}_{в\ кс\ охл} = \frac{G_{в\ кс\ отб}}{G},$$

где $G_{в\ кс\ отб}$ – расход воздуха на конвективное охлаждение сопловых лопаток первой ступени;

G – расход газа на выходе из камеры сгорания;

$\bar{G}_{в\ кр\ охл}$ – относительный расход воздуха на конвективное охлаждение рабочих лопаток первой ступени турбины

$$\bar{G}_{в\ кр\ охл} = \frac{G_{в\ кр\ отб}}{G},$$

$G_{в\ кр\ отб}$ – расход воздуха на конвективное охлаждение рабочих лопаток первой ступени турбины;

a, m – эмпирические коэффициенты, являющиеся функциями величины отношения расхода воздуха на пленочное охлаждение к расходу воздуха на конвективное охлаждение лопаток турбины;

$u_{лс}, u_{лр}$ – безразмерная глубина охлаждения сопловых и рабочих лопаток турбины:

$$\theta_{лс}, \theta_{лр} = f(\theta_{\max}, T_z, T_k, [T_{л}]),$$

[3], где $[T_l]$ – допустимая температура лопаток.

С использованием зависимостей в [2], связывающих характеристики камеры сгорания с режимными и геометрическими параметрами зависимости (1), произведено расчетное исследование влияния значений геометрических параметров камеры сгорания высокотемпературного двигателя на величину эффективного коэффициента полезного действия термодинамического цикла.

В расчете задавались: система охлаждения сопловой лопатки - конвективно-пленочная, рабочей лопатки первой ступени турбины - конвективная; допустимые значения температуры сопловой и рабочей лопаток (при расчете $\theta_{лс}$ и $\theta_{лр}$) для современных материалов, из которых они изготовлены – 1323 К и 1223 К.

В расчете принято $\eta_c = 0.85$; $\eta_p = 0.9$ [4], а также условие подобия распределения температуры газа по высоте канала в сечении на входе в сопловый аппарат турбины (на выходе из камеры сгорания) и в сечении

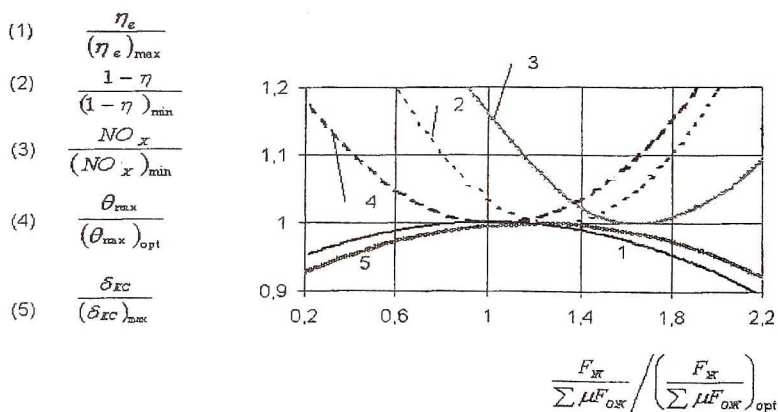


Рис.1. Изменение эффективного коэффициента полезного действия термодинамического цикла и характеристик камеры сгорания от геометрического критерия $F_{ж} / \sum M F_{ож}$

(1) $\eta_e / (\eta_e)_{\max}$; (2) $1 - \eta_{кс} / (1 - \eta_{кс})_{\max}$; (3) $EI_{NO_x} / (EI_{NO_x})_{\text{opt}}$;

(4) $u_{\max} / (u_{\max})_{\text{opt}}$; (5) $\delta_{кс} / (\delta_{кс})_{\text{opt}}$; (6) $F_{ж} / \sum M F_{ож} / F_{ж} / (\sum M F_{ож})_{\text{opt}}$

перед рабочей лопаткой первой ступени турбины (для расчета θ_{pl}).

В результате расчетного анализа выявлено наличие оптимальной величины конструктивного параметра $\left(\frac{F_{жс}}{\sum \mu \cdot F_{ож}} \right)_{opt} = 6.3$, обеспечивающего, при прочих равных условиях, максимальное значение эффективного коэффициента полезного действия цикла, что иллюстрируется графиком на рис.1.

По оси абсцисс на графике рис.1 отложены значения параметра $\frac{F_{жс}}{\sum \mu \cdot F_{ож}}$, отнесенные к его значению, обеспечивающему максимальную величину z_e . По оси ординат отложены величины z_e и $\delta_{кс} = 1 - \sigma_{кс}$, отнесенные к своему максимальному значению, величины недожога топлива в камере сгорания $1 - \eta_{кс}$, выбросов оксидов азота EI_{NOx} и коэффициента окружной неравномерности поля температуры δ , отнесенные к их минимальному значению.

Увеличение z_e при движении по левой ветке кривой с увеличением значения $\frac{F_{жс}}{\sum \mu \cdot F_{ож}}$ связано с уменьшением отборов воздуха для охлаждения турбины из-за уменьшения неравномерности поля температуры газа и с уменьшением недожога топлива. Дальнейшее увеличение параметра $\frac{F_{жс}}{\sum \mu \cdot F_{ож}}$ сверх оптимального значения приводит к росту неравномерности поля температуры газа, т.е. к увеличению отборов воздуха для охлаждения турбины, что снижает величину эффективного коэффициента полезного действия цикла.

С точки зрения обеспечения минимального выброса токсичных компонентов оксидов азота (кривая 3 на рис.1) требуется увеличение значения параметра $\frac{F_{жс}}{\sum \mu \cdot F_{ож}}$ сверх оптимального значения, что отрицательно скажется на экономичности газотурбинной установки.

Оптимальное значение относительной суммарной площади отверстий жаровой трубы учитывается в системе автоматизированного проектирования камеры сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегральная математическая модель камеры сгорания. / Саркисов А.А., Митрофанов В.А., Рудаков О.А. // Теплоэнергетика. 2004. № 2.
2. Система уравнений для расчета характеристик камеры сгорания. / Саркисов А.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д., Митрофанов В.А. // Промышленная теплотехника, 2001. № 3. Т.23. С. 83-88.
3. Конструкция, теория и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей. / Рудаков О.А., Саркисов А.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В. // Учебное пособие. – СПб, СПбГТУ, 1993. – 170с.
4. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных двигателей. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1990. – 703с.

УДК 621.438

**КРИТЕРИЙ СТАБИЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ
ПОТОКА ГАЗА В ДИФFUЗОРЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Митрофанов В.А., Рудаков О.А., Сигалов Ю.В.

ФГУП «Завод имени В.Я. Климова», г. Санкт-Петербург

Одной из основных задач при создании камеры сгорания газотурбинного двигателя является обеспечение стабильности протекающих в ней процессов. Источником нестабильности может явиться диффузор камеры сгорания при неправильном его проектировании. Например, нестабильность течения потока газа в диффузоре приводит к повышению неравномерности поля температуры газа на выходе из камеры сгорания, причем проявление повышенной неравномерности отличается нестационарным характером.

Для анализа течения потока газа в диффузоре камеры сгорания рассмотрим уравнение сохранения количества движения потока газа в дифференциальной форме и уравнение неразрывности: