

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:

$$\begin{aligned}
& \rho \cdot \frac{\partial W}{\partial t} + \rho u \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + \rho v \cdot \frac{\partial W}{\partial y} + \rho w \cdot \frac{\partial W}{\partial z} = (\mu_l + \mu_{lt}) \times \\
& \times \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \mu_{lt}}{\partial x} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial \mu_{lt}}{\partial y} \cdot \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial \mu_{lt}}{\partial z} \cdot \frac{\partial W}{\partial z} - \\
& - \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \left(\zeta + \frac{1}{3} \cdot \mu_l \right) \times \\
& \times \left[\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) \right]; \tag{1}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \tag{2}$$

где P, ρ – давление и плотность газа; W – вектор скорости потока газа (осредненной по Рейнольдсу для турбулентного потока); μ – вторая вязкость газа; u, v, w – проекции вектора скорости движения потока газа на декартовы оси координат; μ_l – коэффициент динамической вязкости газа; μ_{lt} – динамический коэффициент турбулентной вязкости газа.

Для описания процессов неустойчивого течения газа положим в уравнении (1) $\frac{\partial W}{\partial t} \neq 0$. При отрыве пограничного слоя от стенок диффузора, поток газа вначале ускоряется, поэтому $\frac{\partial W}{\partial t} > 0$.

С учетом этого, применим подход к изучению нестационарных процессов, аналогичный изложенному в [1], и преобразуем уравнение (1) к неравенству, выполнив математические операции над левой и правой частями соотношения (1) и левой частью уравнения (2), представленные в [2] для квазистационарного процесса и введя коэффициенты $a_1 \dots a_6$, характеризующие неравномерность распределения параметров от выхода к входу в объем диффузора.

После интегрирования и преобразований (1)–(2) получим неравенство:

$$\begin{aligned} \partial P < \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{V_d}{F_m \cdot \chi} \cdot \left(\frac{G}{V_d} \right)^2 \cdot \left(-\frac{\delta F}{F_m} \right) \cdot \chi^2 \times \\ \times \left\{ \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{a_1}{a_2} \cdot \bar{\ell}_d + \frac{V_d}{F_m \cdot \chi} \cdot a_3 \right) + \frac{\delta \mu_{\Gamma}}{\rho_m \cdot W_m \cdot \chi} \cdot \frac{a_4}{a_5} \cdot \bar{\ell}_d - a_6 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

С другой стороны, для диффузора:

$$\partial P \sim - \left(1 - \frac{F_{\text{вх}}}{F_{\text{вых}}} \right)^2 \cdot \rho_m \cdot W_{\text{вх}}^2,$$

где $F_{\text{вх}}, F_{\text{вых}}$ – площадь поперечного сечения на входе в диффузор и на выходе из диффузора; индекс « m » обозначает среднюю величину параметра в диапазоне ее изменения от входа к выходу из рассматриваемого объема; индекс « δ » обозначает изменение величины параметра от выхода ко входу в объем; χ – характерный размер; ℓ_d – длина диффузора; $\bar{\ell}_d$ – длина диффузора, отнесенная к высоте входного сечения; V_d – объем диффузора; $W_{\text{вх}}$ – скорость потока газа на входе в диффузор.

Подставив это выражение в левую часть неравенства (3), приняв, что $F_m = \frac{F_{\text{вх}} + F_{\text{вых}}}{2}$, $\ell_d = \chi$, а также, используя разработанную авторами модель турбулентных явлений в потоке сплошной среды [3], окончательно получим условие неустойчивого течения газа в диффузоре:

$$\left(1 - \frac{F_{\text{вх}}}{F_{\text{вых}}} \right) \cdot \frac{V_d}{F_{\text{вх}} \cdot \chi} \cdot f(\bar{\ell}_d) > \psi \left(a_1 \dots a_6; \frac{\bar{\ell}_d}{\text{Re}} \right). \quad (4)$$

Используем экспериментальные данные по испытанию плоских моделей диффузоров, опубликованные в [4].

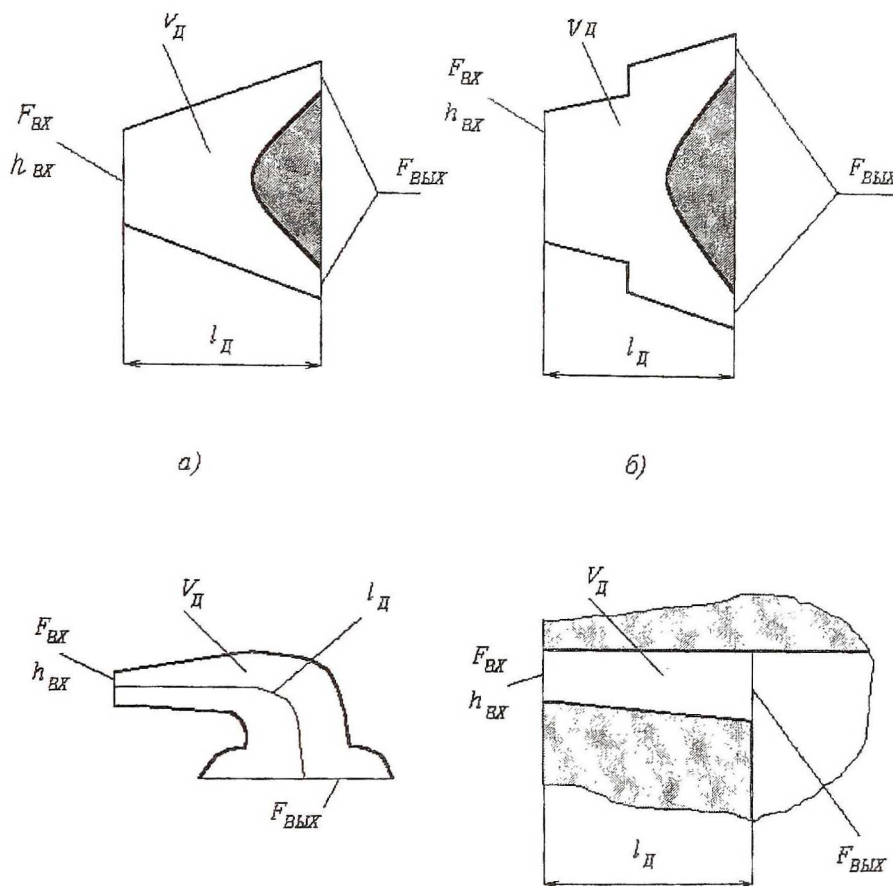


Рис.1. Схемы диффузоров испытанных камер сгорания

Применительно к плоскому диффузору комплексы, входящие в (4), равны:

$$\frac{V_D}{F_{BX} \cdot \chi} = \frac{1}{3} \cdot \left[2 + 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \bar{\ell}_D + \sqrt{1 + 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \bar{\ell}_D} \right];$$

$$\frac{F_{BX}}{F_{BLYX}} = 1 + 2 \cdot \bar{\ell}_D \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где α – угол между осью и стенкой диффузора.

Для течения газа с числами $Re > 10^5$ отношение $\frac{\bar{\ell}_d}{Re} \rightarrow 0$.

В работе [4] представлены предельные значения сочетаний параметров α и $\bar{\ell}_d$ плоского диффузора, сверх которых происходит переход от стационарного к нестационарному течению газа с отрывом потока от стенок диффузора.

После обработки экспериментальных данных в [4] условие перехода к нестабильному течению газа в диффузоре [4], которое обозначим через A , преобразуется к виду:

$$A = \left(1 - \frac{F_{\text{вх}}}{F_{\text{вых}}} \right) \cdot \frac{V_d}{F_{\text{вх}} \cdot \ell_d} \cdot (\bar{\ell}_d)^{-0,38} > 0.374, \quad (5)$$

Диффузоры испытанных камер сгорания серийных турбовальных, турбовинтовых и турбореактивных двигателей показаны на рис.1:

кольцевые с центральным телом – а) и ступенчатые – б);

криволинейные ступенчатые диффузоры – в);

кольцевые безотрывные диффузоры – г).

В качестве параметра, характеризующего нестабильность течения газа в диффузоре камеры сгорания, примем отношение:

$$\frac{\Delta\theta_{\text{max}}}{(\theta_{\text{max}})_{\text{ср}}},$$

где $u_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{к}}}{T_z - T_{\text{к}}}$; T_{max} – максимальное значение местной температуры

газа в выходном сечении камеры сгорания; T_z – среднemasсовая температура газа в выходном сечении камеры сгорания; $T_{\text{к}}$ – температура

воздуха на входе в камеру сгорания; Δu_{max} – максимальная величина

разброса значения коэффициента окружной неравномерности поля температуры газа для различных экземпляров камеры сгорания одинаковой

конструкции; $(u_{\text{max}})_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента окружной неравномерности поля температуры газа на выходе из камеры сгорания определенной конструкции для различных экземпляров.

График на рис.2 иллюстрирует зависимость величины $\frac{\Delta u_{max}}{(u_{max})_{cp}}$ для прямоточных, противоточных кольцевых и одиночных камер сгорания с диффузорами всех типов, показанными на рис.1, серийно изготавливаемых и экспериментальных двигателей от параметра A .

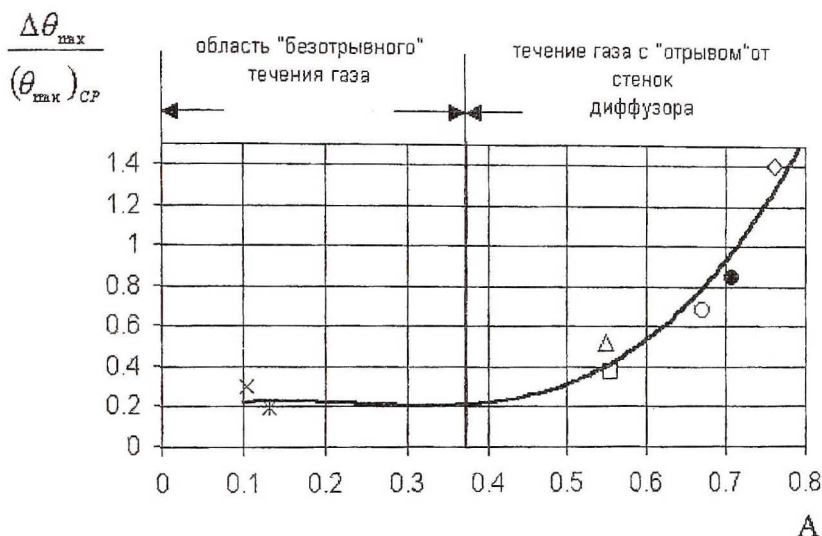


Рис.2. Влияние величины конструктивного критерия диффузора на стабильность поля температуры газа перед турбиной. Испытания камер сгорания с диффузорами по схемам рис.1: а) Δ , \circ , \bullet ; б) \square ; в) \diamond ; г) \times , $-$, Ж. Сплошная кривая — эмпирическая зависимость уровня неустойчивости поля температуры.

Из анализа рис.2 следует, что при величине параметра $A < 0,374$, т.е. при стабильном течении газа в диффузоре (см. полученное выше критериальное условие (5)), разброс коэффициента окружной неравномерности поля температуры газа на выходе из камеры сгорания от экземпляра к экземпляру минимален и обусловлен только разбросом геометрических размеров проточной части камеры сгорания в пределах поля допуска при ее изготовлении.

С ростом величины $A < 0,374$ неустойчивость поля температуры газа на выходе из камеры сгорания также возрастает. Такая неустойчивость θ_{max} в выходном сечении камеры сгорания высокотемпературного

двигателя может явиться причиной возникновения дефектов на элементах конструкции турбины в процессе эксплуатации двигателя. Поэтому при проектировании диффузоров камеры сгорания должно учитываться критериальное условие (5) и зависимость, представленная на рис.2.

Разработанный критерий стабильности течения газа в диффузорах является одной из составных частей в системе автоматизированного проектирования камеры сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование области воспламенения топлива в камере сгорания. / Саркисов А.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д., Митрофанов В.А. // Теплоэнергетика. 2003. №3. -С.47-51.
2. Метод решения дифференциальных уравнений тепломассообмена и газовой динамики, описывающих процессы горения в камере сгорания. / Саркисов А.А., Митрофанов В.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д. // Промышленная теплотехника. 2001. Т.23. №6. -С.15-18.
3. Митрофанов В.А., Рудаков В.А. Определение параметров турбулентности потока газа в камере сгорания на основе интегрирования и преобразований уравнений Рейнольдса и Навье-Стокса. Вестник СГАУ. 2003. №2. -С. 92-96.
4. Исследование течения в моделях диффузоров камер сгорания. / Безменов В.Я., Асеев Г.Д., Тарараксина А.П. // Технический отчет ЦИАМ №5836. 1967.