

МЕТОД РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2007 А. В. Григорьев, В. А. Митрофанов, О. А. Рудаков, А. В. Соловьева

ОАО «Климов», г. Санкт-Петербург

Обоснована формула для оценки величины интенсивности турбулентности потока газа на выходе из камеры сгорания газотурбинного двигателя и показана связь этой величины со значениями ее конструктивных параметров.

В настоящее время при решении задачи гидроаэродинамики вычислительными методами для газотурбинного двигателя возникает проблема оценки параметров турбулентности потока на выходе из такого элемента конструкции, как камера сгорания.

В работах [1, 2, 3] авторами предложен интегральный подход к оценке характеристик турбулентности потока газа, связывающий параметры турбулентности с размерами канала переменной или постоянной геометрии, в котором происходит течение потока сплошной среды.

Запишем уравнение Навье-Стокса для установившегося турбулентного течения, представив истинную скорость потока сплошной среды как сумму средней скорости потока (с осреднением по Рейнольдсу) и ее пульсационной составляющей в форме

$$\begin{aligned} & ru \frac{\partial W}{\partial x} + rv \frac{\partial W}{\partial y} + rw \frac{\partial W}{\partial z} + \\ & + ru' \frac{\partial W'}{\partial x} + rv' \frac{\partial W'}{\partial y} + rw' \frac{\partial W'}{\partial z} = \\ & = m_t \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

где W – вектор средней скорости потока сплошной среды (жидкости, газа); P , r – давление и плотность потока сплошной среды; u, v, w – проекции вектора средней скорости потока на декартовы оси координат, μ_1 – коэффициент динамической вязкости жидкости или газа; знак «'» обозначает пульсационные составляющие скорости потока (знак, обозначающий осреднение по времени, опускаем).

Произведем преобразование написанного выше уравнения, умножив его левую и

правую части на величину $dV = dx dy dz$, а также вводя понятие элементарного массового расхода dG жидкости или газа через элемент поверхности, нормальный к линии тока, являющейся диагональю параллелепипеда со сторонами $dx dy dz$, ограничивающими этот элемент:

$$dF = dy dz \cos(L, x) = dx dz \cos(L, y) = dx dy \cos(L, z);$$

$$\frac{u}{\cos(L, x)} = \frac{v}{\cos(L, y)} = \frac{w}{\cos(L, z)} = W; dG = rW dF,$$

где dF – площадь элемента поверхности, нормального к линии тока; L обозначает направление вдоль линии тока.

Преобразованное уравнение с использованием формулы Грина, а также принимая $m_t = const$ в рассматриваемом объеме, интегрируем в следующих пределах:

$$\begin{aligned} & \int_{G_L}^G dG \int_{W_1}^{W_2} dW = m_t \frac{dW}{c} \iint_{S_P} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{n}} dS - \\ & - \frac{dP}{c} \iiint_{V_P} \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right) dx dy dz - \end{aligned}$$

$$- F_m \int_{-W'}^{W'} r W' dW';$$

где G_L – массовый расход жидкости (газа) через трубку тока; G – массовый расход жидкости (газа) через рассматриваемый объем V_P ; S_P – площадь поверхности, охватываю-

щей рассматриваемый объем; dS – площадь элемента поверхности, охватывающей рассматриваемый объем; F – площадь проходного сечения канала рассматриваемого объема; d – изменение величины параметра от выхода из рассматриваемого объема до входа в этот объем; $\bar{U} = \frac{W}{dW}$; $\bar{P} = \frac{P}{dP}$ – коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения параметров в пространстве рассматриваемого объема (параметры в числителе представляют собой местные значения);

$$\bar{n} = \frac{\bar{x}}{\cos(n, x)} \mathbf{i} + \frac{\bar{y}}{\cos(n, y)} \mathbf{j} + \frac{\bar{z}}{\cos(n, z)} \mathbf{k};$$

$\bar{x} = \frac{x}{c}$; $\bar{y} = \frac{y}{c}$; $\bar{z} = \frac{z}{c}$; n – нормаль к поверхности, охватывающей рассматриваемый объем; c – характерный размер рассматриваемого объема; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – единичные орты; m – средняя величина параметра в диапазоне его изменения от выхода из рассматриваемого объема ко входу в этот объем; индексы «1» и «2» обозначают соответственно вход в рассматриваемый объем и выход из него.

Изменение величины давления на протяжении области турбулентного движения определим в соответствии с [2]:

$$dP = -Kr_m W_m^2 \left(\left(\frac{dW}{W_m} \right)^2 + B \frac{\bar{l}_P}{Re} \right);$$

здесь K, B – коэффициенты пропорциональности; \bar{l}_P – относительная длина рассматриваемого объема.

Произведя интегрирование и преобразования, получим

$$\frac{G}{V_p} dW \left(1 - CA_{\bar{U}} \frac{m_l}{c^2 \frac{G}{V_p}} \right) + r(W')^2 F_m = \frac{Kr_m W_m^2 \left(\left(\frac{dW}{W_m} \right)^2 + B \frac{\bar{l}_P}{Re} \right) A_{\bar{P}}}{c};$$

$$\text{где } A_{\bar{U}} = \frac{\iint_{S_p} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{n}} dS}{S_p}; A_{\bar{P}} = \frac{\iiint_{V_p} \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right) dx dy dz}{V_p} -$$

функции, учитывающие влияние неравномерности распределения параметров в пространстве рассматриваемого объема; C – коэффициент пропорциональности; комплекс $\frac{m_l}{c^2 \frac{G}{V_p}}$

представляет собой соотношение скоростей молекулярного и конвективного переноса количества движения в потоке [(кг/с м³)/

(кг/с м³)], с другой стороны $\frac{m_l}{c^2 \frac{G}{V_p}} \sim \frac{\bar{l}_P}{Re}$.

Правая часть написанного выражения характеризует работу сил давления, обусловленных переменной геометрией канала и сил трения, затрачиваемую на изменение количества движения потока в пространстве рассматриваемого объема и «порождение» турбулентности; слагаемые в левой части характеризуют перенос потоком импульса с учетом вязкости среды и кинетическую энергию турбулентных пульсаций скорости потока в пространстве рассматриваемого объема.

Окончательно после преобразований получаем

$$\varepsilon^2 = KA_{\bar{P}} \left[\left(\frac{\delta W}{W_m} \right)^2 + B \frac{\bar{l}_P}{Re} \right] \frac{V_p}{F_m \chi} - \left(\frac{\delta W}{W_m} \right) \left(1 - A_{\bar{W}} C_1 \frac{\bar{l}_P}{Re} \right). \quad (1)$$

Левая часть полученного соотношения есть критерий Кармана $\varepsilon^2 = \frac{(W')^2}{W_m^2}$; C_1 – коэффициент пропорциональности.

В общем виде для потока с неравномерным распределением параметров в пространстве рассматриваемого объема $A_{\bar{P}}, A_{\bar{W}}$ являются функцией гидродинамических, геометрических критериев $\frac{dW}{W_m}, \frac{\bar{l}_P}{Re}, \bar{l}_P, \frac{V_p}{F_m c}$ и начальной неравномерности распределения

параметров на входе в рассматриваемый объем.

Соотношение (1) подтверждено опубликованными экспериментальными данными по измерению параметров турбулентности в конфузормом канале, смешивающихся спутных турбулентных струях и в пограничном слое, набегающего на пластину потока [2].

В работе [4] приведены данные по измерению интенсивности турбулентных пульсаций потока воздуха при втекании в него поперечных струй на модели смесителя камеры сгорания с варьированием следующих параметров: $\frac{G_1}{G_2}$ – отношения массовых рас-

ходов воздуха в поперечных струях и в основном потоке; $\frac{F_{ж}}{SmF_{ож}}$ – отношения площа-

дей поперечного сечения канала для основного потока и суммарной эффективной площади отверстий для подвода воздуха в основной поток (m – коэффициент расхода); t – шага между отверстиями подвода воздуха; l – длины от отверстий до сечения измерения интенсивности турбулентных пульсаций. Измерения производились при условии изотермичности взаимодействующих потоков и постоянства геометрии канала для основного потока с $H = \text{const}$, где H – высота исследуемого канала.

Пределы изменения варьируемых параметров в [3]:

$$\frac{G_1}{G_2} \approx 0,2...0,45; \quad \frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} \approx 3...13;$$

$$\frac{t}{H} \approx 0,44...1,02; \quad \frac{l}{H} \approx 0,5...1,8.$$

Экспериментальные данные в [3] описываются выражением (1), которое после их обработки приобретает вид

$$e^2 = (1 + \bar{l})^{-0,5} \left(0,029 \left(\frac{dW}{W_m} \right)^2 + 0,0748 \left| \frac{dW}{W_m} \right| \right) + 0,002; \quad (2)$$

$$\text{здесь } \frac{dW}{W_m} \sim \frac{\frac{G_1}{G_2} \frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} - 1}{\frac{G_1}{G_2} \frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} + 1}; \quad \frac{V_P}{F_m c} = \text{const}; \quad \bar{l} = \frac{l}{H}.$$

На рис. 1 представлено сопоставление расчетных (обозначение на рисунке – «расч.») и экспериментальных данных (обозначение на рисунке – «эксп.»).

Перейдем к интегральной оценке интенсивности турбулентных пульсаций в камере сгорания, используя (2). Для всего объема жаровой трубы камеры сгорания, где происходят процессы турбулентного смешения,

с учетом того, что $\frac{G_1}{G_2} = 1$, выражение (2)

приобретает вид

$$e^2 = (1 + \bar{l}_r)^{-0,5} \left(0,029 \left(\frac{\frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} - 1}{\frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} + 1} \right)^2 + 0,0748 \sqrt{\left(\frac{\frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} - 1}{\frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} + 1} \right)^2} \right) + 0,002; \quad (3)$$

где \bar{l}_r – относительная длина от последнего ряда отверстий жаровой трубы до сечения выхода из камеры сгорания (относительная длина газосборника жаровой трубы камеры сгорания).

Рис. 2 иллюстрирует влияние величины параметра $\frac{F_{ж}}{SmF_{ож}}$ на интенсивность турбулентных пульсаций в камере сгорания. Расчет произведен по (3) при $\bar{l}_r = 1,1$. По оси ординат графика на рис. 2 отложены значения интенсивности турбулентных пульсаций в процентах.

График на рис. 3 иллюстрирует влияние на «затухание» интенсивности турбулентных пульсаций длины газосборника жаро-

вой трубы при $\frac{F_{ж}}{SmF_{ож}} = 9$.

Расчетные соотношения (2) и (3) могут быть использованы для оценки интенсивности турбулентных пульсаций на входе в сопловой аппарат турбины при решении дифференциальных уравнений газовой динамики численными методами применительно к газотурбинному двигателю.

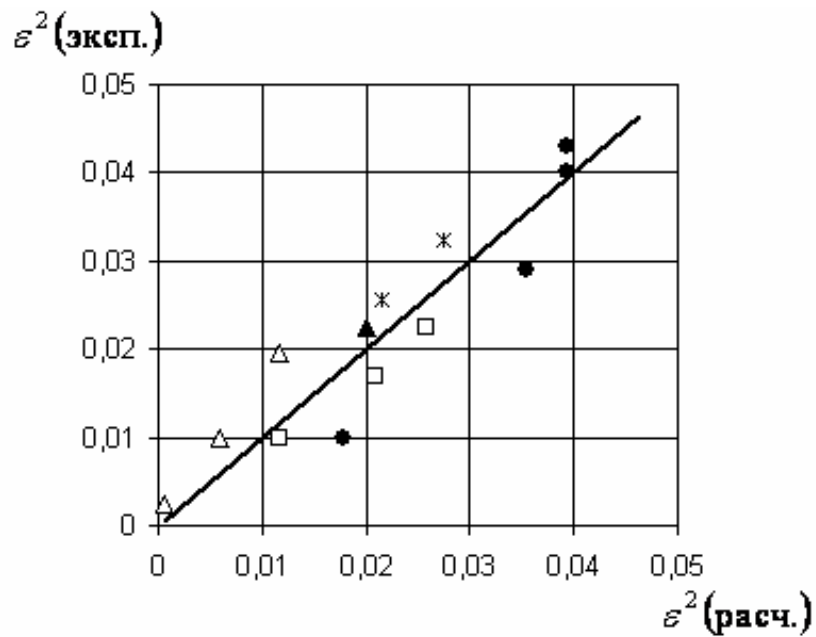


Рис.1. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по измерению интенсивности турбулентных пульсаций

$$\bullet - \frac{t}{H} = 1,02; \frac{F_{\text{ж}}}{SmF_{\text{Ож}}} = 13,2; \frac{G_1}{G_2} = var; \bar{l} = 1,1;$$

$$\triangle - \frac{t}{H} = 0,44; \frac{F_{\text{ж}}}{SmF_{\text{Ож}}} = 3,25; \frac{G_1}{G_2} = var; \bar{l} = 1,1;$$

$$\square - \frac{t}{H} = 0,44; \frac{F_{\text{ж}}}{SmF_{\text{Ож}}} = 6,5; \frac{G_1}{G_2} = var; \bar{l} = 1,1;$$

$$\blacktriangle - \frac{t}{H} = 0,44; \frac{F_{\text{ж}}}{SmF_{\text{Ож}}} = 4; \frac{G_1}{G_2} = 0,12; \bar{l} = 1,1;$$

$$\text{Ж} - \frac{t}{H} = 0,44; \frac{F_{\text{ж}}}{SmF_{\text{Ож}}} = 4; \frac{G_1}{G_2} = 0,22; \bar{l} = var - \text{экспериментальные точки,}$$

соответствующие различным геометрическим и гидродинамическим параметрам испытываемых моделей [4]

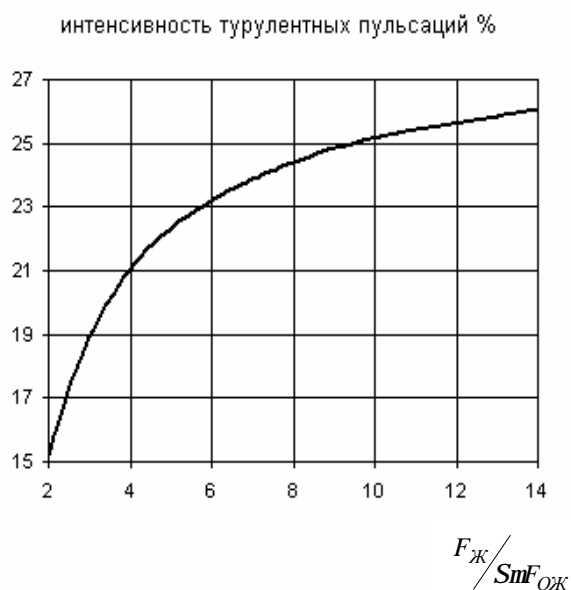


Рис. 2. Влияние на интенсивность турбулентных пульсаций относительной суммарной площади отверстий жаровой трубы камеры сгорания

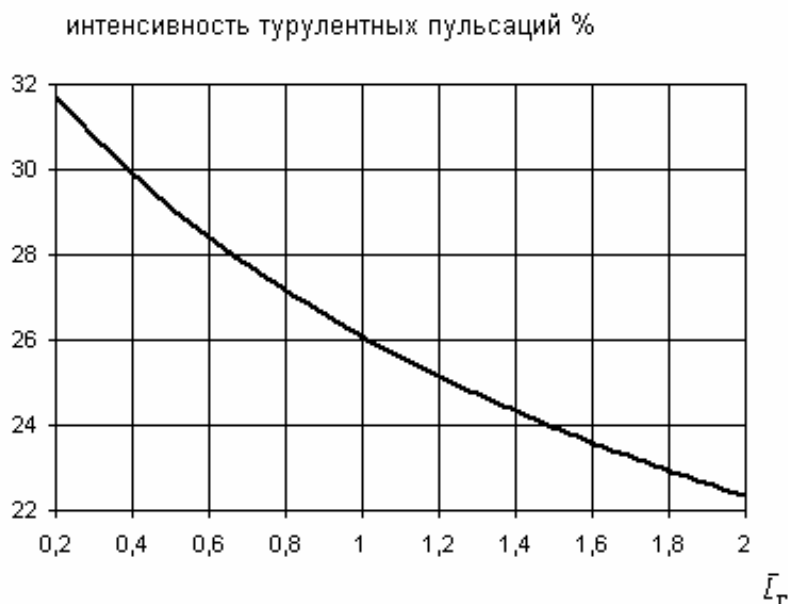


Рис. 3. Влияние на интенсивность турбулентных пульсаций длины газосборника жаровой трубы камеры сгорания

Список литературы

1. Митрофанов В. А., Рудаков О. 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.

2. Митрофанов В. А., Рудаков О. А. Критериальная модель турбулентных явлений в потоке сплошной среды при ее движении по каналу переменной геометрии // Пром. теплотехника.- 2004. - №3.

3. Григорьев А. В., Митрофанов В. А., Рудаков О. А., Сигалов Ю. В. Теоретическое обоснование критического числа Рейнольдса как функции гидродинамических и геометрических критериев потока // Уткинские чтения. Материалы конференции. Т.2. - СПб.: БГТУ, 2005.

4. Безменов В. Я., Онищик И. И. Экспериментальное исследование процесса смешения газовых потоков в моделях смесителей кольцевых камер сгорания ГТД / Технический отчет. – ЦИАМ, 1965.