

УДК 621.43.056

В.Е. КОСТЮК, Е.И. КИРИЛАШ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКА ЗА ДЫРЧАТЫМ СМЕСИТЕЛЕМ К ОТКЛОНЕНИЯМ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ОТВЕРСТИЙ

Исследована степень влияния коэффициента расхода отверстий дырчатого смесителя, имеющего конструкцию, характерную для основных камер сгорания ГТД, на температурную неравномерность потока за ним на основе анализа аналитических зависимостей, обобщающих экспериментальные данные о распределении температуры в области ниже по течению от ряда холодных струй, вдуваемых по нормали в горячий поток, ограниченный стенками. Показано, как с помощью этих коэффициентов можно оценить стабильность температурного поля газа при наличии дестабилизирующих факторов, влияющих на коэффициент расхода отверстий, и правильно назначить целевые показатели точности его расчетных оценок.

Ключевые слова: камера сгорания, дырчатый смеситель, температурное поле газа, коэффициент расхода отверстий, возмущения, анализ чувствительности, точность расчетных оценок.

Надежность работы газотурбинного двигателя (ГТД) зависит от распределения температуры газа перед турбиной. Желаемое температурное поле достигается перемешиванием в камерах сгорания (КС) ГТД горячих продуктов сгорания с холодным воздухом. Для организации процесса смешения широко применяют так называемые дырчатые смесители [1], принцип действия которых основан на проникновении струй холодного воздуха в поперечно движущийся поток горячих газов.

Вдуву струй в поперечный поток посвящено уже так много публикаций, что эту трехмерную задачу аэрогидродинамики, наверно, можно причислить к разряду классических. Тем не менее, вопрос о влиянии возмущений коэффициента расхода отверстий дырчатого смесителя на распределение температуры потока за ним до сих пор оставался вне поля зрения исследователей.

Исследование данного вопроса с одной стороны помогло бы оценить стабильность температурного поля, формируемого дырчатым смесителем, при наличии, как правило, неконтролируемых, но, тем не менее, влияющих на коэффициент расхода дестабилизирующих факторов (например, отклонений размеров и формы отверстия, заусенцев на его кромках и т.п.), а с другой – способствовало бы правильному назначению целевых показателей точности расчетных оценок коэффициента расхода смесительных отверстий.

Цель настоящей работы состоит в количественной оценке степени влияния коэффициента расхода отверстий на температурную неравномерность

потока за дырчатым смесителем на основе анализа аналитических зависимостей, предложенных J. Holdeman и R. Walker [2] для обобщения полученных ими экспериментальных данных о распределении температуры в области ниже по течению от ряда холодных струй, вдуваемых по нормали в горячий поток, ограниченный стенками.

В работе J. Holdeman и R. Walker [2] результаты измерений поля температуры представлены в форме вертикальных профилей безразмерной относительной разности температур

$$\Theta = (T_{\infty} - T)/(T_{\infty} - T_j), \quad (1)$$

где T – локальная температура торможения; T_{∞} – температура торможения невозмущенного основного течения; T_j – температура торможения газа в струе. Поскольку $T_{\infty} > T_j$, максимальные значения Θ в любом профиле соответствуют наиболее холодным областям течения.

Критерием максимальной температурной неравномерности потока в определенном сечении может служить экстремальное значение Θ , например, максимальное. Очевидно, что геометрическое место точек с максимальным значением Θ определяет тепловую траекторию струи (осевую линию). Поэтому в качестве критерия максимальной температурной неравномерности можно принять относительную разность температур вдоль осевой линии $\Theta_{c,0}$, которую J. Holdeman и R. Walker [2] предложили аппроксимировать функцией

$$\Theta_{c,0} = \Theta_{EB} + (1 - \Theta_{EB}) \left[1,452J^{-0,35} / \left(\frac{X}{D_j} \right)^f \right], \quad (2)$$

где $\Theta_{EB} = \frac{G_j/G_\infty}{1+G_j/G_\infty}$ – относительная разность температур, возникающая при полном смешении потоков; $J = (\rho_j V_j^2) / (\rho_\infty U_\infty^2)$; ρ_j – плотность струи; ρ_∞ – плотность основного потока; V_j – скорость струи; U_∞ – скорость основного потока; X – расстояние вниз по течению от сечения вдува; $D_j = D\sqrt{\mu}$ – диаметр струи; D – диаметр отверстия; μ – коэффициент расхода отверстия; $f = 1,15\sqrt{\frac{S}{H}/\left(1+\frac{S}{H}\right)}$; S – расстояние между осями соседних отверстий; H – высота канала.

Отношение массового расхода в струе к массовому расходу основного потока G_j/G_∞ выражается через параметры каждого потока и геометрические параметры:

$$G_j/G_\infty = \left(\sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_\infty}} \sqrt{J} \frac{\pi}{4} \mu \right) / \left[\left(\frac{H}{D} \right) \left(\frac{S}{D} \right) \right]. \quad (3)$$

С учетом выражения (3) преобразуем функцию (2) к виду

$$\Theta_{c,0} = \frac{AB\mu^{(C-1)} + 1}{B\mu^{-1} + 1}, \quad (4)$$

$$\text{где } A = \left[\frac{1,452J^{-0,35}}{\left(\frac{X}{D}\right)} \right]^f, \quad B = \frac{\left(\frac{H}{D}\right)\left(\frac{S}{D}\right)}{\sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_\infty}} \sqrt{J} \frac{\pi}{4}}, \quad C = 0,5f.$$

Количественно степень влияния μ на $\Theta_{c,0}$ оценивается с помощью частных производных $a = \partial\Theta_{c,0}/\partial\mu$ или $b = \mu_{ном}/\Theta_{c,0,ном}$, где индекс «ном» означает номинальные значения параметров, а a и b – соответственно абсолютный и относительный коэффициенты чувствительности [3].

Обозначим через $\delta\Theta_{c,0}$ относительное изменение $\Theta_{c,0}$, а через $\delta\mu$ – относительное изменение μ . Используя указанное выше определение b , имеем $\delta\Theta_{c,0} = b \cdot \delta\mu$.

Продифференцировав $\Theta_{c,0}$ по μ , получим:

$$a = \frac{AB^2C\mu^{(C-3)} + AB(C-1)\mu^{(C-2)} + B\mu^{-2}}{(B\mu^{-1} + 1)^2}. \quad (5)$$

Результаты расчетов коэффициентов чувствительности для $\mu_{ном} = 0,64$ и $\rho_j/\rho_\infty = 2,2$ при различных сочетаниях параметров каждого потока и геометрических параметров, имевших место в опытах J. Holdeman и R. Walker [2], приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что в исследованном диапазоне значений $J \approx 6 \dots 62$, $H/D = 4 \dots 16$, $S/D = 2 \dots 6$ и $X/H = 0,25 \dots 2$, характерных для условий КС ГТД, абсолютный коэффициент чувствительности изменяется в пределах $a = 0,12 \dots 0,42$, а относительный

коэффициент чувствительности – в пределах $b = 0,16 \dots 0,45$. Последнее означает, что, к примеру, отклонение μ на 1 % от его номинального значения приведет к изменению $\Theta_{c,0}$ на $0,16 \dots 0,45$ % относительно $\Theta_{c,0,ном}$, а отклонение μ на 6 % – к изменению $\Theta_{c,0}$ на $1,0 \dots 2,7$ %.

Таблица 1

Результаты расчетов

J	H/D	S/D	S/H	X/D	$\Theta_{c,0,ном}$	a	b
6	8	4	0,5	2	0,49	0,27	0,35
6	8	4	0,5	4	0,33	0,20	0,26
6	8	4	0,5	8	0,23	0,16	0,20
6	8	4	0,5	16	0,16	0,13	0,17
62	8	4	0,5	2	0,38	0,27	0,35
62	8	4	0,5	4	0,30	0,24	0,32
62	8	4	0,5	8	0,24	0,23	0,30
62	8	4	0,5	16	0,21	0,22	0,29
6,5	12	4	0,33	12	0,21	0,12	0,16
12,3	12	4	0,33	12	0,20	0,13	0,17
23,4	12	4	0,33	12	0,20	0,15	0,19
60,3	12	4	0,33	12	0,21	0,18	0,23
6	8	2	0,25	8	0,34	0,20	0,26
6	5,7	2,8	0,49	5,7	0,31	0,22	0,28
6	4	4	1	4	0,30	0,24	0,31
60	8	2	0,25	8	0,40	0,30	0,40
60	5,7	2,8	0,49	5,7	0,37	0,31	0,41
60	4	4	1	4	0,35	0,32	0,42
25	8	2	0,25	8	0,36	0,26	0,34
25	8	3	0,38	8	0,27	0,22	0,28
25	8	4	0,5	8	0,22	0,19	0,25
25	8	6	0,75	8	0,17	0,15	0,19
25	16	2	0,13	16	0,32	0,18	0,23
25	12	2	0,17	12	0,33	0,21	0,27
25	8	2	0,25	8	0,36	0,26	0,34
25	6	2	0,33	6	0,39	0,29	0,39
25	4	2	0,5	4	0,46	0,34	0,45
25	8	4	0,5	8	0,22	0,19	0,25
25	5,7	2,8	0,49	5,7	0,32	0,27	0,35
25	4	2	0,5	4	0,46	0,34	0,45
25	8	4	0,5	16	0,18	0,17	0,23
25	5,7	2,8	0,49	11,4	0,27	0,26	0,34
25	4	2	0,5	8	0,34	0,41	0,45
57,3	12	2	0,17	12	0,25	0,35	0,32
25,2	8	2	0,25	8	0,26	0,36	0,34
15,2	6	2	0,33	6	0,27	0,38	0,36
5,6	4	2	0,5	4	0,29	0,42	0,38

Практическая значимость полученных результатов видна из следующих примеров.

Пример 1. В КС малоразмерных ГТД встречаются отверстия с $0,25 < \bar{l} < 1,5$, где $\bar{l} = l/D$ (l – толщина стенки) и неустойчивым режимом истечения, в результате чего измерения коэффициентов расхода показывают большое рассеивание его значений (до 10%) [4]. Из полученного выше диапазона значений относительного коэффициента чувствительности $b = 0,16 \dots 0,45$ следует, что неустойчивость режима истечения может приводить к отклонению $\Theta_{c,0}$ на $1,6 \dots 4,5$ % от его номинального значения, т.е. температурное поле, формируемое дырчатым смесителем, весьма стабильно к возмущениям μ .

Пример 2. Целевой показатель абсолютной погрешности численных оценок максимального подгрева газа КС, сформулированный Н. Mongia [5], составляет $\Delta\Theta_{\max} = \pm 0,03$. Исходя из полученных выше диапазонов значений абсолютного и относительного коэффициентов чувствительности $a = 0,12 \dots 0,42$ и $b = 0,16 \dots 0,45$ и в пренебрежении погрешностями иных параметров, кроме μ , получим, что для обеспечения указанного выше различия по Θ_{\max} абсолютная погрешность численных оценок коэффициентов расхода отверстий ЖТ должна составлять не более $\Delta\mu = \Delta\Theta_{\max}/a = 0,07 \dots 0,25$, а относительная (при $\Theta_{\max,ном} = 0,3$) – не более $\delta\mu = \delta\Theta_{\max}/\Theta_{\max,ном}/b = 22 \dots 63\%$. Если погрешности расчетных оценок коэффициентов расхода отверстий ЖТ превышают указанные выше значения, то обеспечить значение $\Delta\Theta_{\max} = \pm 0,03$ невозможно.

Выполненное исследование позволило количественно оценить степень влияния коэффициента расхода отверстий дырчатого смесителя на температурную неравномерность потока за ним. Направления дальнейших исследований авторы видят в установлении

«нижнего» предела допустимой погрешности расчетных оценок коэффициента расхода отверстий ЖТ.

Литература

1. Нарезжний Э.Г. Камеры сгорания судовых газотурбинных установок / Э.Г. Нарезжний, А.В. Сударев. – Л.: Судостроение, 1973. – 232 с.
2. Holdeman J.D. Mixing of a Row of Jets with a Confined Crossflow / J.D. Holdeman, R.E. Walker // *AIAA Journal*, Vol. 54, Feb. 1977. – PP. 243-249.
3. Кузьмик П.К. Системы автоматизированного проектирования. Кн. 5. Автоматизация функционального проектирования / П.К. Кузьмик, В.Б. Маничев; под ред. И.П. Норенкова. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 141 с.
4. Шейнак А.А. Гидравлика и гидроневомпривод. Ч.1: Основы механики жидкости и газа / А.А. Шейнак. – М.: МГИУ, 2006. – 266 с.
5. Mongia H.C. A Synopsis of Gas Turbine Combustor Design Methodology Evolution of Last 25 Years / H.C. Mongia // *XV ISABE*. – Bangalore, India. September 3-7, 2001 (ISABE-2001-1086). – 19 p.

Поступила в редакцию 21.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЧУТЛИВІСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОТОКА ЗА ДІРЧАСТИМ ЗМІШУВАЧЕМ ДО ВІДХИЛЕНЬ КОЕФІЦІЄНТА ВИТРАТИ ОТВОРІВ

В.Є. Костюк, О.І. Кирилаш

Досліджено ступінь впливу коефіцієнта витрати отворів дірчастого змішувача, що має конструкцію, характерну для основних камер згоряння ГТД, на температурну нерівномірність потоку за ним на основі аналізу аналітичних залежностей, узагальнюючих експериментальні дані про розподіл температури в області, нижче за течією від ряду холодних струменів, які вдуваються по нормалі в гарячий потік, обмежений стінками. Показано, як за допомогою цих коефіцієнтів можна оцінити стабільність температурного поля газу за наявності дестабілізуючих факторів, що впливають на коефіцієнт витрати отворів, і правильно призначити цільові показники точності його розрахункових оцінок.

Ключові слова: камера згоряння, дірчастий змішувач, температурне поле газу, коефіцієнт витрати отворів, збурення, аналіз чутливості, точність розрахункових оцінок

SENSITIVITY OF THE FLOW TEMPERATURE NONUNIFORMITY BEHIND PERFORATED MIXER TO THE ORIFICE DISCHARGE COEFFICIENT DEFLECTIONS

V. Ye. Kostyuk, Ye. I. Kirilash

The influence degree of the orifice discharge coefficient of the perforated mixer that has the design typical for the gas turbine main combustion chambers on the flow temperature nonuniformity behind it is investigated. It is based on the analysis of the analytical dependences generalized experimental temperature distribution data downstream of the cold jets row normal injected into wall-bounded hot flow. It is shown how gas temperature field stability can be estimated with the help of these coefficients under destabilizing factors influencing on the orifice discharge coefficient and how goal accuracy indices of it calculated evaluations are correctly set.

Key words: combustion chamber, perforated mixer, gas temperature field, orifice discharge coefficient, perturbations, sensitivity analysis, calculated evaluations accuracy.

Костюк Владимир Евгеньевич – канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник кафедры конструкции авиационных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

Кирилаш Елена Ивановна – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.