

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В ЭЛЕМЕНТАХ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Осипов Е. В.¹, Ивашин А. Ф.¹, Кривошеев И. А.², Кожин Д. Г.²

¹АО «ВПК «НПО машиностроения» – филиал Конструкторское бюро «Орион», г. Оренбург, Россия (460005, г. Оренбург, ул. Шевченко, д. 26), e-mail: kborion@esoo.ru;

²ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Россия (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12), e-mail: office@ugatu.su

Представлено совершенствование метода эквивалентного диффузора, широко применяемого для расчетов потерь в диффузорных каналах газотурбинных двигателей (ГТД) и изделий ракетно-космической техники (РКТ). Метод усовершенствован для расчетов диффузорных каналов сложной геометрии, соединяющих турбины на разных диаметрах и имеющих большую конусность обводов проточной части. Совершенствование выполнено с использованием данных экспериментальных исследований, выполненных на модели диффузора в условиях, максимально приближенных к его натурной работе в составе ГТД. Выполнено сравнение коэффициентов восстановления полного давления экспериментально исследованного диффузорного канала со значениями, полученными по методу эквивалентного диффузора. Уточнение метода эквивалентного диффузора произведено по коэффициентам поправки, определенным для разных углов раскрытия эквивалентного диффузора и в широком диапазоне режимов работы ГТД.

Ключевые слова: переходной диффузор, совершенствование метода, экспериментальные данные.

IMPROVEMENT OF CALCULATION METHOD OF LOSSES IN THE ELEMENTS OF FLOW PART OF ENGINES USING EXPERIMENTAL DATA

Osipov E. V.¹, Ivashin A. F.¹, Krivosheev I. A.², Kozhinov D. G.²

¹JSC «MIC «NPO Mashinostroyeniya» - branch design office «Orion», Orenburg, Russia (460005, Orenburg, Shevchenko str., 26), e-mail: kborion@esoo.ru;

² FGBOU VPO "Ufa state aviation technical University", Ufa, Russia (450000, Ufa, K. Marksa str., 12, e-mail: office@ugatu.su

Presented improvement of the method of the equivalent diffuser which is widely used for calculations of losses in the diffuser channels of gas turbine engines (GTE) and products of rocket and space technology (RST). The method is improved for calculation of the diffuser channels of complex geometry that connects the turbine at different diameters and having a large taper area of the flow. The improvement is made of using data from experimental studies performed on the model of the diffuser in conditions as close as possible to his field work as part of GTE. The comparison of the coefficients of the recovery of the total pressure are experimentally studied the diffuser channel with the values obtained by the method of equivalent diffuser. The specification method is equivalent to the diffuser produced from the coefficients of the amendment, determined for different angles of the equivalent diffuser and in a wide range of modes of GTE.

Keywords: transitional diffuser, the improvement of the method, experimental data.

При проектировании ГТД и РКТ широко используются полуэмпирические методы расчета потерь в конфузорных и диффузорных кольцевых и межлопаточных каналах. К ним относится метод эквивалентного диффузора. Данный метод имеет погрешность, которая может достигать при определении коэффициента потерь в кольцевых диффузорах 20 % [2]. Это также подтверждают исследования, выполненные в работе [1], где коэффициент внутренних потерь, определенный по методу эквивалентного диффузора для осекольцевого

диффузора со степенью диффузорности $n=1,6$, показал существенно заниженный результат, на 12 % ниже, по сравнению с экспериментальными значениями.

Другой метод определения потерь М. Е. Дейча, А. Е. Зарякина основан на определении потерь по экспериментальным номограммам. Метод разработан с использованием экспериментальных исследований, выполненных по интегральной методике [2, 3]. По данным [1] коэффициент внутренних потерь экспериментально исследованного осекольцевого диффузора на 5 % ниже, по сравнению с этим методом.

Метод А. С. Гиневского основан на интегральных характеристиках пограничного слоя, в нем вычисляются последовательным приближением относительные площади вытеснения δ^* и потери энергии δ^{**} в выходном сечении диффузора [5]. По данным [2] погрешность расчета потерь этим методом составляет от 5 до 8 %. По результатам работы [1] коэффициент внутренних потерь экспериментально исследованного диффузора на 7,6 % выше, по сравнению со значением, полученным по методу А. С. Гиневского.

Удобство и простота применения, несмотря на высокую погрешность, сделали метод эквивалентного диффузора, широко распространенный в проектировании на предприятиях-разработчиках авиационной и РКТ. В связи с этим, для минимизации погрешности при расчетах потерь в диффузорных каналах, примыкающих к ним элементам и ГТД в целом, актуальной является задача повышения точности метода эквивалентного диффузора.

Объекты и методы их исследования

В современных турбореактивных двухконтурных двигателях (ТРДД) с большой степенью двухконтурности и при конвертации авиационных ГТД в наземные газотурбинные установки (ГТУ) между турбинами выполняется кольцевой диффузорный канал, соединяющий турбины на разных диаметрах. Для уменьшения массы и длины ГТД проектировщиками рассматриваются возможности сокращения длины диффузорного канала. Проточная часть таких каналов образуется коническими или коноидальными поверхностями. Если при этом проектные диаметры турбин сохраняются, то конусность обводов диффузорного канала и степень диффузорности увеличиваются, что существенно влияет на газодинамические характеристики диффузорного канала и расположенной за ним турбины (за счет увеличения потерь в диффузорном канале и неравномерности потока на входе в турбину) [4, 6].

Целью выполненной авторами работы является уточнение метода эквивалентного диффузора и определение соответствующих коэффициентов поправки для расчетов диффузорных каналов большой конусности. Для достижения этой цели были использованы результаты экспериментальных исследований, полученные в работах [4, 6, 7].

Результаты исследований и их обсуждение

Известная зависимость метода эквивалентного диффузора, по которой определяется коэффициент полезного действия диффузора η_d , в зависимости от угла раскрытия эквивалентного диффузора α_3 показан на рисунке 1. В этом случае угол раскрытия эквивалентного диффузора определяется по формуле:

$$\alpha_3 = 2 \arctg \frac{\sqrt{F_{BX}} - \sqrt{F_{ВЫХ}}}{\sqrt{\pi \cdot L}}, \quad (1)$$

где F_{BX} , $F_{ВЫХ}$ – кольцевые площади проточной части на входе и выходе из диффузорного канала, м²;

L – длина диффузорного канала, м.

Переход от КПД диффузора к коэффициенту восстановления полного давления σ выполнен по формуле:

$$\sigma = 1 - [1 - \pi(\lambda_{BX})](1 - \eta_d), \quad (2)$$

где λ_{BX} – приведенная скорость газового потока на входе в диффузорный канал.

Коэффициент восстановления полного давления диффузорного канала представляет собой отношение полного давления на выходе $P_{ВЫХ}^*$ к полному давлению на входе $P_{ВХ}^*$ в диффузорный канал:

$$\sigma = \frac{P_{ВЫХ}^*}{P_{ВХ}^*}, \quad (3)$$

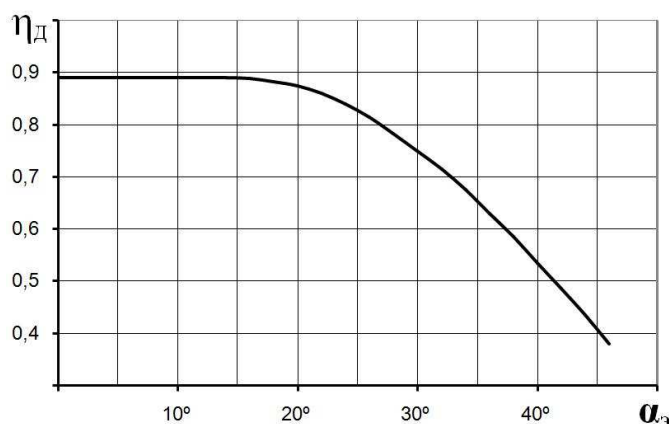


Рис. 1. Зависимость КПД диффузора от угла раскрытия эквивалентного диффузора

Для расчетов потерь в диффузорных каналах в широком диапазоне режимов работы, полученные по формуле (2), зависимости коэффициента восстановления полного давления от угла раскрытия эквивалентного диффузора представлены для разных значений

приведенной скорости газового потока на входе в диффузорный канал $\lambda_{BX1} = 0,27$, $\lambda_{BX2} = 0,32$, $\lambda_{BX3} = 0,37$, $\lambda_{BX4} = 0,42$, $\lambda_{BX5} = 0,47$, $\lambda_{BX6} = 0,56$ и показаны на рисунке 2.

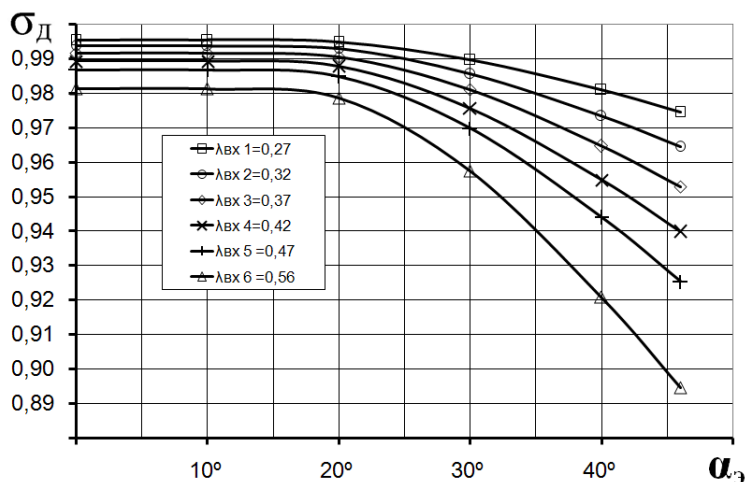


Рис. 2. Зависимости коэффициента восстановления полного давления диффузорного канала от угла раскрытия эквивалентного диффузора для разных режимов работы

Такие полуэмпирические зависимости полезны при расчете компрессоров и переходных каналов в проточной части ГТД.

Авторами выявлено, что расчет вышеупомянутых диффузорных каналов, отличающихся большой конусностью обводов по методу эквивалентного диффузора, имеет существенную погрешность, так как метод основан на обобщении результатов исследований в основном осевых диффузоров, тогда как требуется исследование всего широкого многообразия осекольцевых диффузоров, в том числе с коническими или коноидальными образующими.

Для сравнения зависимостей, полученных по методу эквивалентного диффузора (рисунок 2) с экспериментальными данными по межтурбинному переходному диффузору, имеющему большую конусность обводов, был выбран диффузор, исследованный в работах [4, 6, 7]. Его исследования были выполнены в условиях, максимально приближенных к натурной работе в составе ГТД. Основные геометрические характеристики диффузора следующие: угол раскрытия эквивалентного диффузора $\alpha_\varepsilon = 29^\circ$, степень диффузорности $n = 2,1$, относительная длина $\bar{L} = 1,1$.

Степень диффузорности и относительная длина диффузора определены по формулам:

$$n = F_{ВЫХ} / F_{ВХ} , \quad (4)$$

$$\bar{L} = L / D_{ВХ}^{HAP} , \quad (5)$$

где $F_{ВХ}, F_{ВЫХ}$ – кольцевые площади проточной части на входе и выходе из диффузора, м²;

L – длина диффузора, м;

D_{BX}^{HAP} – периферийный диаметр на входе в диффузор, м.

Экспериментальная зависимость коэффициента восстановления полного давления от приведенной скорости на входе в диффузор [4, 6] для описанного выше диффузора представлена на рисунке 3.

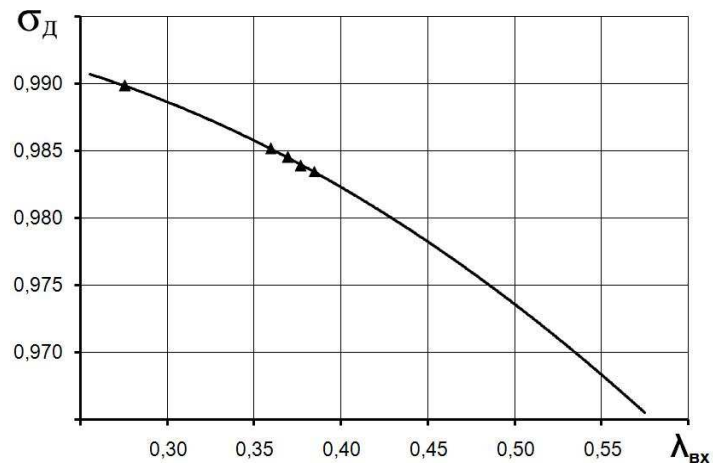


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента восстановления полного давления от приведенной скорости на входе в диффузор

Используя зависимость, показанную на рисунке 3, определены экспериментальные коэффициенты восстановления полного давления диффузора для приведенных скоростей газового потока на входе в диффузор $\lambda_{BX1} = 0,27$, $\lambda_{BX2} = 0,32$, $\lambda_{BX3} = 0,37$, $\lambda_{BX4} = 0,42$, $\lambda_{BX5} = 0,47$ и $\lambda_{BX6} = 0,56$. Найденные экспериментальные точки нанесены на поле графика рисунка 2 и показаны на рисунке 4. Экспериментальные точки соответствуют углу раскрытия эквивалентного диффузора $\alpha_3 = 29^\circ$.

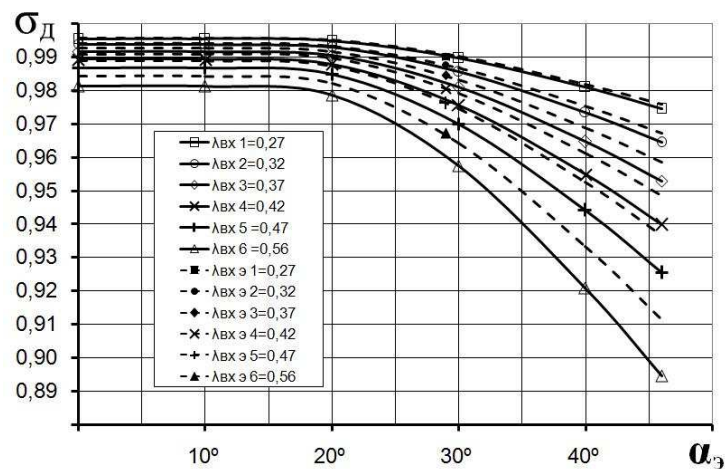


Рис. 4. Зависимости коэффициента восстановления полного давления диффузора от угла раскрытия эквивалентного диффузора: сплошная линия – по методу эквивалентного диффузора; пунктирная линия – по экспериментальным данным

Полагая, что форма кривых зависимостей коэффициента восстановления полного давления диффузорного канала от угла раскрытия эквивалентного диффузора по методу эквивалентного диффузора от экспериментальной будет отличаться незначительно, через нанесенные экспериментальные точки были построены эквидистанты вышеописанным кривым. Таким образом, получены новые зависимости для рассматриваемого типа диффузора (рисунок 4). Из рисунка видно, что коэффициенты восстановления полного давления экспериментально исследованного диффузорного канала выше, чем полученные по методу эквивалентного диффузора и по мере роста приведенной скорости разность между теоретическими и экспериментальными значениями возрастает. Таким образом, установлено, что при расчетах диффузорных каналов, ограниченных конусами или коноидами с большой конусностью, метод эквивалентного диффузора дает завышенные потери.

Анализ потерь в диффузорном канале, рассчитанных по методу эквивалентного диффузора и полученных экспериментально, выполнен с использованием коэффициента внутренних потерь, который определяется по формуле:

$$\zeta = \frac{1 - \sigma}{\frac{k}{2} \cdot M_{BX}^2 \cdot \pi(M_{BX})}, \quad (6)$$

где k – показатель изоэнтропы, для воздуха равен 1,4;

M_{BX} – число Маха на входе в диффузорный канал;

$\pi(M_{BX})$ – функция приведенного давления, характеризующая термодинамическое состояние газа.

График зависимости коэффициента внутренних потерь диффузорного канала от приведенной скорости на входе в диффузор, для углов раскрытия эквивалентного диффузора 0° , 10° , 20° , 29° , 40° и 46° представлен на рисунке 5.

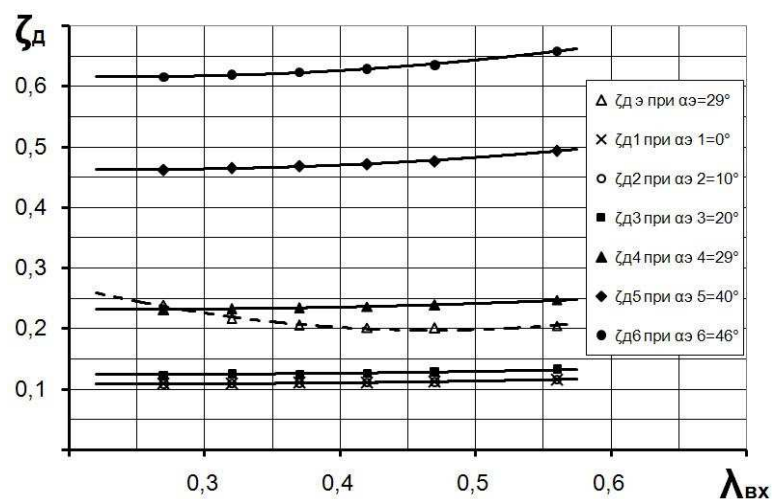


Рис. 5. Зависимости коэффициента внутренних потерь диффузорного канала от приведенной скорости на входе в диффузор

Сравнение коэффициентов внутренних потерь по методу эквивалентного диффузора с экспериментом показывает, что метод эквивалентного диффузора дает завышенные потери. Погрешность определения потерь по методу эквивалентного диффузора для диффузорных каналов большой конусности составляет около 16 % в распространенном для ГТД диапазоне приведенной скорости на входе в диффузор $\lambda_{ВХ} = 0,35...0,55$.

Имея теоретические и экспериментальные зависимости коэффициента восстановления полного давления от угла раскрытия эквивалентного диффузора (рисунок 4), для уточнения метода эквивалентного диффузора применительно к диффузорам большой конусности были рассчитаны коэффициенты поправки:

$$K = \frac{\sigma_{0 \text{ экв Д}} - \sigma_{\text{эсп}}}{\sigma_{0 \text{ экв Д}} - \sigma_{\text{экв Д}}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{0 \text{ экв Д}}$ – коэффициент восстановления полного давления по методу эквивалентного диффузора при угле раскрытия эквивалентного диффузора равном нулю;

$\sigma_{\text{экв Д}}$ – коэффициент восстановления полного давления по методу эквивалентного диффузора при соответствующем угле раскрытия эквивалентного диффузора;

$\sigma_{\text{эсп}}$ – коэффициент восстановления полного давления по экспериментальным данным при соответствующем угле раскрытия эквивалентного диффузора.

Рассчитанные коэффициенты поправки К для соответствующих углов раскрытия эквивалентного диффузора и приведенных скоростей газового потока на входе в диффузорный канал приведены в таблице.

		Коэффициент поправки К					
		α_3					
		0°	10°	20°	30°	40°	46°
$\lambda_{ВХ}$	0,27	0	0	0,704	0,917	0,938	0,942
	0,32	0	0	0,603	0,877	0,906	0,913
	0,37	0	0	0,475	0,809	0,852	0,861
	0,42	0	0	0,417	0,769	0,820	0,830
	0,47	0	0	0,402	0,758	0,810	0,821
	0,46	0	0	0,389	0,748	0,802	0,813

Уточнение метода эквивалентного диффузора для расчетов диффузорных каналов, ограниченных конусами или коноидами с большой конусностью, производится с использованием коэффициентов поправок по формуле:

$$\sigma' = \sigma_{0 \text{ экв Д}} - K \cdot (\sigma_{0 \text{ экв Д}} - \sigma_{\text{экв Д}}), \quad (8)$$

где σ' – коэффициент восстановления полного давления по методу эквивалентного диффузора с учетом коэффициента поправки.

Выводы

Использование уточненного метода эквивалентного диффузора по найденным коэффициентам поправки позволяет производить расчеты коэффициентов восстановления полного давления в диффузорных каналах, ограниченных конусами или коноидами большой конусности, а также в межлопаточных диффузорных каналах с привлечением экспериментальных данных или результатов 3D CAD/CAE-моделирования (в пакетах типа Ansys CFX, StarCD, FlowER), с минимальной погрешностью и повысить точность расчетов диффузорных каналов и ГТД в целом.

Список литературы

1. Богомолов Е. Н. Исследование особенностей течения потока воздуха в кольцевых диффузорных каналах газотурбинных двигателей / Е. Н. Богомолов, А. В. Кашеев // Авиационно-косм. техника и технология. – 2006. – № 7 (33). – С. 42-44.
2. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. – М. Энергия, 1970. – 384 с.
3. Довжик С. А. Исследование кольцевых диффузоров осевых турбомашин / С. А. Довжик, А. И. Морозов // Промышленная аэродинамика. – Москва, «Оборонгиз», 1961. – № 20. – С. 87-93.
4. Кривошеев И. А. Использование экспериментальных методов для совершенствования характеристик газового тракта турбин ГТД / И. А. Кривошеев, Е. В. Осипов // Вестник УГАТУ: Изд-во УГАТУ. – Уфа, 2010. – № 3. – С. 3-15.
5. Мигай В. К., Гудков Э. И. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин. – Л.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
6. Осипов Е. В. Методы совершенствования газодинамических характеристик турбин ГТД при различных схемах подвода газа: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 177 с.

7. Осипов Е. В. Экспериментальный метод совершенствования характеристик переходного диффузора с расположенной за ним турбиной ГТД / Е. В. Осипов, И. А. Кривошеев // Вестник ВГТУ: Изд-во ВГТУ. – Воронеж, 2010. – Т. 6. – № 4. – С. 125-130.

Рецензенты:

Горюнов И. М., д.т.н., профессор кафедры авиационных двигателей ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа;

Припадчев А. Д., д.т.н., доцент кафедры летательных аппаратов ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург.