

УДК 621.438

Е.Н. БОГОМОЛОВ, А.В. КАЩЕЕВ

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия
имени П.А. Соловьева, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА В КОЛЬЦЕВЫХ ДИФFUЗОРНЫХ КАНАЛАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Приведено подробное исследование течения потока воздуха в кольцевых диффузорах с входной окружной неравномерностью применительно к межтурбинным переходным каналам. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными методами.

кольцевые диффузоры, межтурбинный переходный канал, гидравлические потери, эксперимент, течение воздуха, диффузорность, неравномерность

Введение

При создании современных газотурбинных двигателей острой проблемой стоит уменьшение числа ступеней лопаточных машин, что позволяет снизить стоимость создания, технического обслуживания и эксплуатации. Для сокращения числа ступеней в многоступенчатых турбинах каскада низкого давления широкое применение находят межтурбинные переходные каналы (PW6000, GP7000, GE90 и др.).

Такие каналы служат для соединения проточных частей турбины высокого давления и турбины низкого давления с большими диаметральными размерами. Течение в таких каналах носит весьма сложный характер вследствие наличия положительного градиента давления, поворота потока, а также значительной неравномерности потока за современными высоконагруженными турбинами. В тоже время влияние аэродинамического совершенства такого переходника на газодинамические характеристики ТНД и основные эксплуатационные показатели двигателя в сравнении с влиянием других факторов весьма велико. Снижение эффективности таких устройств на 1% приводит в среднем к увеличению на 0,3% Суд и снижению на 2,2% тяги двигателя для ТРДД с умеренной степенью двухконтурности ($m = 6$).

Формулирование проблемы. Для обоснованного выбора геометрических параметров и уровня потерь в межтурбинном переходном канале ещё на стадии увязки ГТД необходимы данные по влиянию основных геометрических характеристик на потери в таких каналах. В настоящее время на практике величина потерь в таких устройствах задается в очень грубом приближении. Поэтому представляет интерес исследование осекольцевых диффузорных каналов с прямолинейными образующими для обоснованного выбора метода оценки потерь в зависимости от геометрических параметров.

1. Геометрические характеристики осекольцевых диффузорных каналов

Такие каналы можно охарактеризовать следующими четырьмя безразмерными геометрическими параметрами: степенью диффузорности $q = F_2/F_1$; радиальной $q_r = r_2/r_1$ или меридиональной $q_m = h_2/h_1$ её составляющей; относительной длиной $\bar{L} = L/D_1$ и относительным диаметром втулки на входе $\bar{d} = d_1/D_1$ (h – полувысота кольцевого канала; r – средний радиус проточной части; d – диаметр втулки; D – диаметр периферии; индексы указывают на вход (1) и выход (2) диффузора).

2. Экспериментальное исследование осекольцевых каналов

На базе низконапорного вентилятора была спроектирована экспериментальная установка, позволяющая исследовать кольцевые каналы при приведенной скорости потока на входе 0,14, при числах порядка $Re = 2 \cdot 10^5$. Так как межтурбинные переходные каналы характеризуются окружной и радиальной неравномерностью потока на входе в экспериментальной установке были поставлены направляющие лопатки.

Проведено детальное исследование течения потока воздуха в двух кольцевых каналах. Осекольцевые каналы имели: $\bar{L} = 1,25$, $\bar{d} = 0,5$. Внутренняя обечайка выполнена сменной. Диффузорность первого канала – $q = q_r = 1,6$, второго – $q = 1$, $q_r = 1,74$; угол между осью канала и средней линии его проточной части $\alpha = 10,2^\circ$ – в первом случае, $\alpha = 12,4^\circ$ – во втором. Проведены замеры полей полного давления на входе и выходе исследуемых каналов, а также было исследовано течение вдоль канала в пристеночных областях втулки и периферии. Путем осреднения полей давлений по расходу были получены коэффициенты внутренних потерь энергии в каналах:

$$\zeta = \frac{P_1^* - P_2^*}{\rho W_1^2 / 2},$$

где P^* – полное давление; ρ – плотность; W – скорость, и составили соответственно 0,142 и 0,065.

Были получены интегральные характеристики пограничных слоев. Анализ течения в исследованных кольцевых каналах показал существенное различие обтекания втулки и периферии. Поток у втулки значительно более устойчивый (формпараметр $H = 1,32 \dots 1,53$ для первого канала, $H = 1,4 \dots 1,81$ – для второго) и имеет меньшую относительную толщину пограничного слоя (для первого канала $\bar{\delta}_{от} = 0,12 \dots 0,4$, $\bar{\delta}_{от} = 0,14 \dots 0,45$ – для второго), чем на периферии ($H = 1,55 \dots 1,82$ для первого канала, $H =$

$= 1,3 \dots 2,2$ для второго). На периферии по длине канала происходит быстрое нарастание пограничного слоя, который носит сильно развитый турбулентный характер даже для безградиентного канала и имеет склонность к отрыву. Однако исследование потока вдоль канала в пристеночных областях показало, что отрыв в исследованных каналах отсутствует несмотря на значительную неравномерность потока.

Неравномерность потока на входе в исследуемые каналы составляла $\bar{W}_1 = 0,855$. Выравнивающая способность второго канала оказалась выше чем у первого. Неравномерность потока на выходе из первого канала составила $\bar{W}_2 = 0,753$, из второго канала $\bar{W}_2 = 0,868$.

3. Сопоставление полученных экспериментальных данных по потерям в каналах с результатами расчета по известным методикам

Существуют несколько полуэмпирических методов расчета потерь в кольцевых диффузорах. Наиболее простой и распространенный метод – эквивалентного диффузора. Расчет потерь через эквивалентный угол раскрытия исследованного авторами кольцевого диффузора со степенью расширения $q = 1,6$ дал сильно заниженный результат – $\zeta = 0,022$ (на 12 % ниже). По данным [1] такой метод определения коэффициента потерь в кольцевых диффузорах может дать недопустимо большую ошибку до 20 %.

Второй метод А.С. Гиневского основан на интегральных характеристиках пограничного слоя – значительно точнее. Полуэмпирический метод расчета потерь в кольцевых диффузорах основан на вычислении последовательным приближением относительных площадей вытеснения δ^* и потери энергии δ^{**} в выходном сечении диффузора [2]. Для того же диффузора значение коэффициента внутренних потерь рассчитанного этим методом составило – $\zeta = 0,066$, что на 7,6% ниже чем экспериментально полученное. В работе [1] авторы отмечают, что аб-

солютная погрешность расчета потерь данным методом не превышает 5...8%. Представляется, что погрешность может быть и выше вследствие того, что сравнение было проведено с опытными данными полученными без учёта неравномерности потока на входе и выходе из диффузора. Применение данного метода для расчета потерь в межтурбинном переходном канале затруднено вследствие необходимости эмпирических коэффициентов в зависимости от геометрии для кольцевых диффузоров.

Третий метод определения потерь М.Е. Дейча, А.Е. Зарянкина по экспериментальным номограммам основан на экспериментальных исследованиях, выполненных по интегральной методике [1 – 3], а также не пригоден для межтурбинных переходников, так как не учитывает неравномерность потока на входе и выходе из канала. Воспользовавшись этими зависимостями с уточнением по втулочному диаметру был определен коэффициент внутренних потерь для исследованного авторами диффузора – $\zeta = 0,09$, что ниже на 5, %.

Проведены расчеты обтекания исследованных кольцевых каналов в 3D постановке задачи на программном комплексе вычислительной газовой динамики CFX – TASCflow с использованием двухпараметрической модели турбулентности SST. Результаты расчета обтекания находятся в хорошем согласовании с проведенным экспериментом (погрешность определения потерь составила менее 1%).

Заключение

Представленное экспериментальное газодинамическое исследование осекольцевых каналов позволило подробно изучить течение в таких каналах и проанализировать оценку потерь различными методами расчета кольцевых диффузоров.

Рассмотренные методы расчета не дали удовлетворительного согласия с экспериментом за исклю-

чением моделирования вязкого течения потока в 3-d задаче, на основе уравнений Навье – Стокса.

Однако на стадии увязки ГТД применение трехмерных методов расчета не приемлемо вследствие больших временных затрат. Представляет интерес получение метода для корректной оценки потерь в межтурбинных переходных каналах.

Многие задачи течения турбулентного потока решаются с использованием степенного описания профиля скорости.

Исходя из работ [4, 5] представляется возможным создание интегрального метода расчета потерь в кольцевых диффузорных каналах на основе степенного представления профиля скорости.

Литература

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. – М. Энергия, 1970. – 384 с.
2. Мигай В.К., Гудков Э.И. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин. – Л.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
3. Довжик С.А., Морозов А.И. Исследование кольцевых диффузоров турбомашин // Промышленная аэродинамика. – Оборонгиз. – 1961. – Вып. 20. – С. 168-201.
4. Богомолов Е.Н. К расчету параметров степенного профиля скорости турбулентного пограничного слоя // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2003. – № 3. – С. 74-76.
5. Богомолов Е.Н. О степенной интерпретации логарифмического распределения скорости в турбулентном пограничном слое // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2001. – № 4. – С. 64-66.

Поступила в редакцию 15.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Шепель, ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск.