

УДК 621.45.02

А.Ю. ТИСАРЕВ, Н.М. ВАСИЛЕВИЧ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ С УЧЁТОМ ДЕФОРМАЦИЙ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статье рассматриваются особенности расчёта лабиринтного уплотнения в составе системы внутреннего воздухообеспечения. Рассмотрено образование конусной формы щели при деформации уплотнительных поверхностей. Исследовались случаи образования конфузорной и диффузорной щели. Описаны особенности выполнения расчётов лабиринтных уплотнений в программных пакетах CFD анализа. Выполнен расчёт расходных характеристик лабиринтного уплотнения при различных величинах параметра конусности уплотнительной щели. В формулы определения утечек через лабиринтные уплотнения введён поправочный коэффициент конусности. Построены зависимости поправочного коэффициента конусности от параметра конусности для различных перепадов давления. Описан алгоритм учёта конусности уплотнительной щели в расчёте систем внутреннего воздухообеспечения.

Ключевые слова: лабиринтное уплотнение, конусность лабиринтной щели, деформация уплотнительных поверхностей, коэффициент конусности.

Введение

Воздушные системы двигателя выполняют важные функции, которые направлены на охлаждение деталей горячей части двигателя, наддув уплотнений опор и трактовых уплотнений, разгрузку радиально-упорных подшипников и др. Основными элементами системы внутреннего воздухообеспечения, отвечающими за разделение сред с различными параметрами рабочего тела и уменьшения утечек из проточной части двигателя являются уплотнения [1].

Лабиринтные уплотнения (ЛУ) являются наиболее распространённым типом уплотнений, используемым в газотурбинных двигателях, и их количество может достигать в одном двигателе нескольких десятков. Это связано с многочисленными преимуществами лабиринтных уплотнений, такими как простота, низкие эксплуатационные расходы, а также низкая вероятность загрязнения твёрдыми частицами.

Правильность определения параметров в ЛУ весьма серьёзно сказывается на точности расчёта всей гидравлической цепи системы внутренних воздушных потоков газотурбинного двигателя. Для уменьшения времени и затрат на этап доводки двигателя необходимо, как можно точнее оценить параметры рабочего тела в проточной части двигателя и во внутренних полостях на этапе проектирования. Уточнение расчётных моделей лабиринтных уплотнений является важной задачей в области авиационного и энергетического двигателестроения.

1. Утечки в лабиринтных уплотнениях

Увеличение параметров цикла газотурбинного двигателя приводит к повышению уровней давления и температуры в проточной части и соответственно во внутренних полостях. Поэтому проблема утечек через уплотнение непрерывно становится острее.

Для определения утечек в лабиринтных уплотнениях можно выделить 3 основных метода:

- 1) аналитический метод;
- 2) метод конечных объёмов;
- 3) экспериментальный метод.

В настоящий момент широкое распространение получил метод конечных объёмов, реализуемый в современных CFD пакетах, благодаря которому возможно оценить не только выходные параметры, но и картину потока внутри уплотнения. Несмотря на это аналитические модели остаются ценным инструментом, поскольку они позволяют получить достаточно точные результаты с использованием минимальных вычислительных ресурсов. Основными недостатками аналитических методов являются ограниченность параметров, определяющих геометрию уплотнения, и узкий диапазон рабочих параметров, в котором вычисление происходит с минимальной ошибкой.

Определению утечек в лабиринтных уплотнениях посвящены работы Стодола [2], Мартина [3], Ходкинсона [4], Эгли [5] и др. Особая роль в расчёте утечек уделяется оценке экспериментального коэффициента расхода, который зависит от особенностей конструкции уплотнения.

2. Радиальный зазор

Радиальный зазор в ЛУ имеет наибольшую степень влияния на его расходные характеристики, и правильное определение его величины является первостепенной задачей при расчёте параметров во внутренних полостях двигателя.

Величина радиального зазора ЛУ формируется из следующих деформаций:

- температурные деформации элементов двигателя;
- механические деформации от действия центробежных сил;
- механические деформации от действия давлений на оболочки;
- осевое перемещение элементов ротора.

Методика расчёта радиальных зазоров лабиринтных уплотнений по циклограмме двигателя описана в [6].

Как правило, при работе двигателя радиальный зазор ЛУ вдоль его длины оказывается не постоянным (см. рис.1), что в свою очередь приводит к образованию конусности лабиринтной щели и соответственно к изменению расходных характеристик.

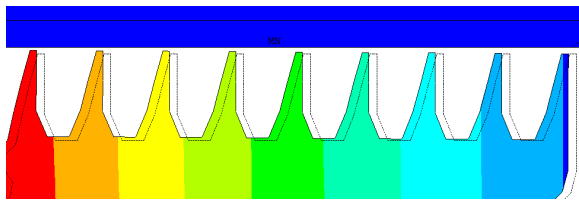


Рис. 1. Радиальные перемещения ЛУ при работе двигателя

Существующие аналитические зависимости не позволяют учесть деформации уплотнительных поверхностей, которые приводят к конусности уплотнения. Поэтому в качестве радиального зазора необходимо принимать постоянную величину: минимальную, максимальную или, например, среднюю величину зазора. Данный подход не является оправданным, так как он не имеет под собой никакой теоретической опоры.

Расчёт методом конечных объёмов позволяет рассчитать уплотнение при любых изменениях его геометрии. Однако связь результатов расчёта уплотнения в CFD пакете и математической модели гидравлической цепи внутренних воздушных потоков приведёт к дополнительному трудоёмкому итерационному циклу. Поэтому предлагается оценить влияние конусности на расходные характеристики уплотнения путём проведения серии расчётов в CFD пакете CFX 13, а далее использовать полученные результаты в аналитических моделях в качестве поправочного коэффициента.

Для оценки конусности уплотнения будет использоваться безразмерный параметр конусности относительно минимальной величины радиального зазора δ_{\min}

$$\Delta = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} \quad (1)$$

Также следует отметить, что конусность щели может быть двух видов: конфузорная (сплошная линия на рис. 2) и диффузорная (пунктирная линия на рис. 2).

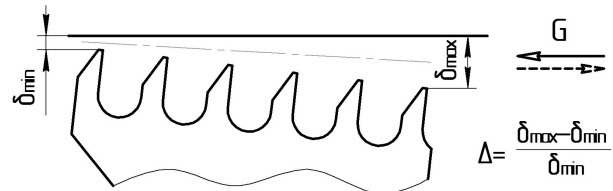


Рис. 2. Величина относительного перекоса уплотнения

3. Коэффициент конусности лабиринтной щели

Для учёта влияния параметра конусности на характеристики уплотнения введён коэффициент конусности

$$K_{\Delta} = \frac{\delta_{\text{эф.}\Delta}}{\delta_{\text{эф.}}} \quad (2)$$

где $\delta_{\text{эф.}}$ – эффективный зазор в уплотнении без конусности лабиринтной щели;

$\delta_{\text{эф.}\Delta}$ – эффективный зазор в ЛУ с конусностью.

Отметим, что

$$\delta_{\text{эф.}} = \delta \cdot \varphi,$$

где δ – рабочий радиальный зазор;

φ – коэффициент расхода.

При определении K_{Δ} в качестве радиального зазора конусной щели принимается минимальный радиальный зазор, т.е.

$$\delta_{\Delta} = \delta_{\min}.$$

Таким образом, формула Стодола для определения утечек через ЛУ с учётом конусности щели примет следующий вид:

$$Q = K_{\Delta} \cdot \varphi \cdot F_{\min} \cdot \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{1 - \pi_y^2}{z}} \quad (3)$$

где $F_{\min} = \pi D_{\text{ср}} \cdot \delta_{\min}$ – площадь сечения щели над гребнем лабиринта.

4. CFD анализ

Геометрические параметры исследуемого уплотнения представлены в таблице 1 и на рис. 3.

Для проведения расчёта была выбрана стационарная постановка (*Steady*). В качестве двухмерной модели используется тип *Axisymmetric Swirl*. Эта

модель учитывает закрутку потока из-за наличия ротора.

Перед началом серии расчётов необходимо выбрать размер элемента сетки, который позволит получать достаточно точные решения, не затрачивая чрезмерного количества времени на расчёт.

Таблица 1
Геометрические параметры уплотнения

Параметр	Расшифровка	Значение
δ , мм	радиальный зазор	0,15
z	число зубьев	6
t , мм	толщина кромки зуба	0,2
s , мм	шаг между зубьями	3
h , мм	высота зуба	3
Дср, мм	средний диаметр	215,8
β , град.	угол наклона зубьев на выходе	60
γ , град.	угол наклона зубьев на входе	90

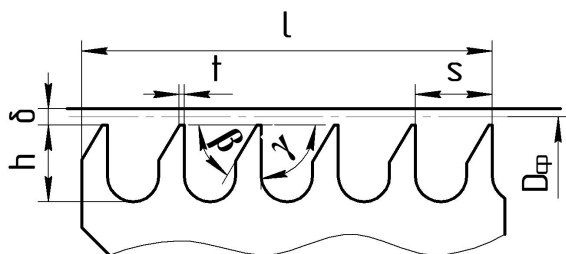


Рис. 3. Геометрические параметры ЛУ

Для оценки качества сетки, а именно влияния сеточной дискретизации на результаты расчета, был использован метод конвергенции сетки (GGI метод), описанный в [7]. Для последующих расчётных исследований была выбрана сетка, состоящая из 164231 элементов, поскольку коэффициенты погрешности данной сетки были получены меньше 1%.

Возле стенок был смоделирован пограничный слой с количеством элементов равным 10 по толщине с фактором роста 1,2. Суммарная толщина погранслоя колебалась от 4 мкм (на стенках зубьев) до 150 мкм (на входе и выходе из зубьев). Это позволило добиться значений $y^+ = 0,9 \dots 6$.

Воздух рассматривается как идеальный газ, вязкость рассчитывается по формулам Сазерленда.

В качестве модели турбулентности выбрана $k-\epsilon$ модель с расширенными пристеночными функциями.

5. Результаты

В результате были построены зависимости коэффициента расхода уплотнения ϕ от перепада давления $\pi_y = p_1/p_2$ для разных величин параметра конусности щели (рис. 4) На рис. 4, а изображены результаты для диффузорной щели, а на рис. 4, б для

конфузорной щели. Далее были построены зависимости коэффициента конусности K_Δ от величины параметра конусности для разных перепадов давления на уплотнении (рис. 5). На рис. 5а изображены результаты для диффузорной щели, а на рис. 5б для конфузорной щели.

На рис. 5 видно, что коэффициент конусности K_Δ практически не зависит от перепада давления при небольших величинах конусности. Для случая конфузорной щели при увеличении конусности характеристики расслаиваются по перепаду сильнее, чем для случая диффузорной щели.

Характеристики, приведённые на рис. 5а можно аппроксимировать зависимостью

$$K_\Delta = 1 + 0,6278 \left(\frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} \right) - 0,1426 \left(\frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} \right)^2. \quad (4)$$

Характеристики, приведённые на рис. 5б можно аппроксимировать зависимостью

$$K_\Delta = 1 + 0,6308 \left(\frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} \right) - 0,313 \left(\frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} \right)^2. \quad (5)$$

Отметим, что данные зависимости были получены для средних перепадов давления ($\pi_y = 1,2 \dots 1,4$) и при увеличении конусности погрешность может возрастать.

6. Алгоритм расчёта лабиринтного уплотнения в составе воздушных систем

В методике расчёта систем внутренних воздушных потоков [6] учтём влияние конусности на расходные характеристики уплотнения по следующему алгоритму.

1. Проводится гидравлический расчёт воздушной системы с монтажными величинами радиальных зазоров. Определяются параметры рабочего тела в полостях, в том числе перепад давления на уплотнении.

2. Тепловой анализ. Определяются температуры, которые используются далее в качестве нагрузки при анализе напряжённо-деформированного состояния двигателя. Анализ проводится методом последовательных приближений до тех пор, пока температуры стенок каналов, заданные в гидравлическом расчёте не будут сходиться с температурами, полученными в тепловом анализе.

3. Расчёт напряжённо-деформированного состояния. Определяется минимальная и максимальная величина зазора. Вычисляется величина параметра конусности по (1).

4. Определяется тип формы лабиринтной щели (конфузорный или диффузорный) и далее по известному перепаду давлению на уплотнении и параметру перекося по рис. 5 а или б определяется коэффициент конусности. При небольших параметрах

рах конусности коэффициент можно определить по формулам (4) или (5).

5. В расчётные зависимости уплотнений, заложенные в программы расчёта гидравлики, вводится коэффициент конусности, либо вводится величина

на эквивалентного радиального зазора, рассчитанного через коэффициент конусности. Далее проводится итерационный расчёт до тех пор, пока радиальный зазор и конусность в расчёте НДС не будут сходиться с заданными в гидравлической модели.

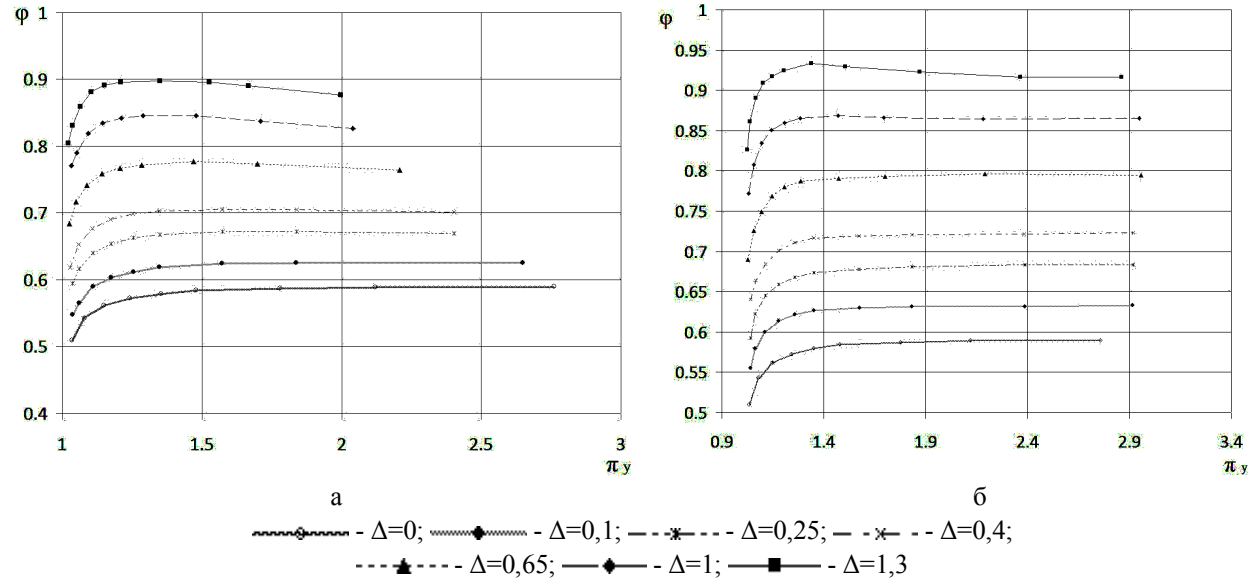


Рис. 4. Расходные характеристики уплотнений для различных значений параметра конусности: а – конфузорная лабиринтная щель; б – диффузная лабиринтная щель

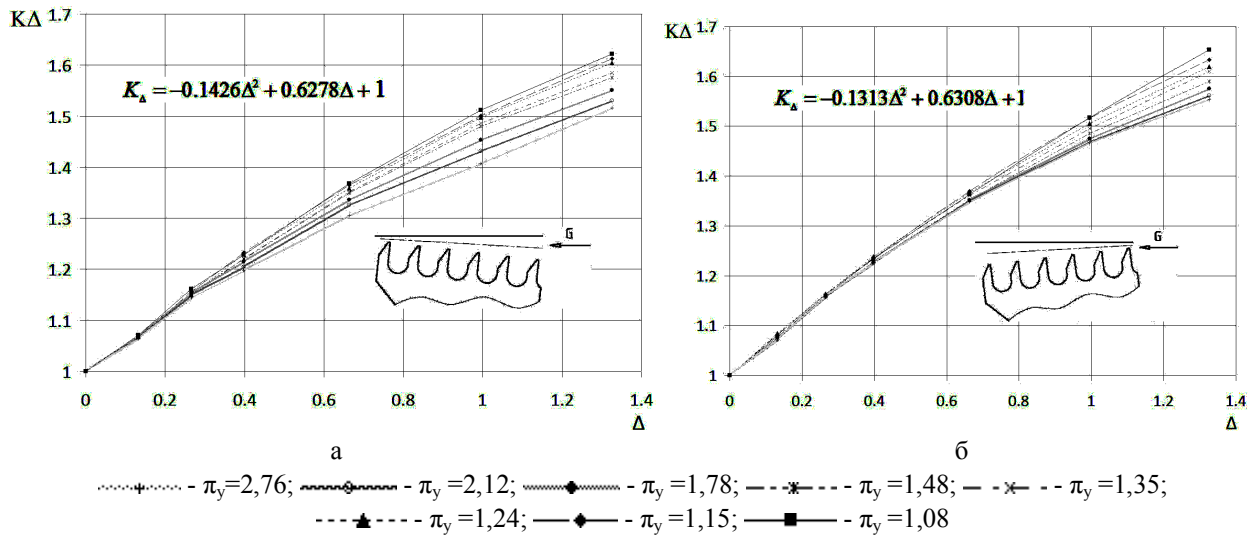


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента перекоса от величины относительного перекоса для различных перепадов давления: а – конфузорная лабиринтная щель; б – диффузная лабиринтная щель

Заключение

В результате работы были определены коэффициенты, позволяющие учесть в аналитических моделях влияние конусности лабиринтной щели на расходные характеристики уплотнения. Для расчёта данных коэффициентов получены зависимости относительно параметра конусности для средних величин перепада давления ($\pi_y = 1,2 \dots 1,4$). Характе-

ристики с увеличением параметра конусности расслаиваются по перепаду давления, однако при небольших значениях конусности (примерно до 0,4 для конфузорной щели и до 0,8 для диффузорной щели) зависимости позволяют получить решение с минимальной ошибкой. Составлен алгоритм учёта конусности уплотнительной щели при расчёте уплотнений в составе системы внутреннего воздухо-снабжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Ми-нобрнауки) на основании Постановления Прави-тельства РФ №218 от 09.04.2010.

Литература

1. Уплотнения и уплотнительная техника [Текст]: справ. / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер, В.В. Гордеев, Б.А. Фурманов, Б.В. Кармугин; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Stodola, A. Steam and Gas Turbines (translated by Loewenstein, L.C.) [Text] / A. Stodola // Peter Smith. – New York, 1945. – Vol. 1. – 45 p.
3. Martin, H. M. Labyrinth Packings [Text] / H.M. Martin // Engineering, – Jan. 1908. – P. 35-36.

4. Hodkinson, B. Estimation of the Leakage through a Labyrinth Gland [Text] / B. Hodkinson // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1939. – № 141. – P. 283–288.

5. Egli, A. The Leakage of Steam through Labyrinth Seals [Text] / A. Egli // Transactions of the ASME, 1935. – P. 115-122.

6. Бондарчук, П.В. Методика расчёта радиальных зазоров по обобщённому полётному циклу двигателя [Текст] / П.В. Бондарчук, А.Ю. Тисарев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8(95). – С. 208-211.

7. Celik, Ismail B. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications [Text] / Ismail B. Celik, Urmila Ghia, Patrick J. Roache // Journal of Fluids Engineering. – 2008. – № 8. – P. 14-20.

Поступила в редакцию 20.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой основ конструирования машин В.Б. Балякин, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Россия.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАБІРИНТОВОГО УЩІЛЬНЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

А.Ю. Тисарев, Н.М. Василевич

У статті розглядаються особливості розрахунку лабіринтового ущільнення в складі системи внутрішнього повітропостачання. Розглянуто утворення конусної форми щілини при деформації поверхонь ущільнювачів. Досліджувалися випадки утворення конфузорної і дифузорної щілини. Описано особливості виконання розрахунків лабіринтових ущільнень у програмних пакетах CFD аналізу. Виконано розрахунок витратних характеристик лабіринтового ущільнення при різних величинах параметра конусності ущільнювальної щілини. У формули для визначення витоків через лабіринтові ущільнення введено поправочний коефіцієнт конусності. Побудовано залежності поправочного коефіцієнта конусності від параметра конусності для різних перепадів тиску. Описано алгоритм урахування утворення конусності ущільнювальної щілини в розрахунок систем внутрішнього повітропостачання.

Ключові слова: лабіринтове ущільнення, конусність лабіринтовою щілини, деформація поверхонь ущільнювачів, коефіцієнт конусності.

INVESTIGATION OF LABIRINT SEALS PERFORMANCES WITH DEFORMATIONS OF SEALING SURFACES

A.Yu. Tisarev, N.M. Vasilevich

The article discusses the features of the labyrinth seal calculation in the secondary air system. The formation of taper gap in the deformation of the sealing surfaces is described. The cases of the formation confuser and diffuser gap are investigated. The features of the labyrinth seals calculations in the CFD analysis software packages are described. The calculation of the flow rate characteristics of the labyrinth seal at different taper parameter sealing gap is made. In the formula for determining the leakage labyrinth seal introduced a correction taper factor. The dependences on the correction taper factor on the taper parameter for different pressure drops are created. The algorithm of accounting formation of taper sealing gap in the calculation system of the secondary air system is describe.

Key words: The labyrinth seal, taper labyrinth gap, deformation of sealing surfaces, taper factor.

Тисарев Андрей Юрьевич – младший научный сотрудник ОНИЛ-1 Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва (национального исследовательского университета), Россия, e-mail: aytisarev@gmail.com.

Василевич Наталья Михайловна – магистрант факультета двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва (национального исследовательского университета), Россия. E-mail vasilevichnatalja@gmail.com.