

ПОДХОДЫ К УПРОЩЁННОМУ РАСЧЁТУ РАСХОДА ЩЁТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Пугачев А.О.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: pugachev@tum.de

Приводятся полуэмпирические и теоретические методы оценки расходной характеристики щёточных уплотнений турбомашин. Описывается предложенный упрощённый подход, основанный на пересчёте значения эффективного зазора для выбранного базового уплотнения, конструкция которого наиболее точно соответствует исследуемому уплотнению. Также описана упрощённая модель течения газа в щёточном уплотнении с использованием модели пористой среды, реализованная в свободно распространяемой программе и позволяющая проводить расчёты в автоматизированном режиме. Применение предложенных подходов проиллюстрировано для оригинальных щёточных уплотнений ГП «Ивченко-Прогресс».

Ключевые слова: щёточное уплотнение, расходная характеристика, инженерный подход, экспериментальные данные, вычислительная гидродинамика.

Введение

Щёточные уплотнения относятся к самой разработанной технологии уплотнений с податливыми элементами, которые устанавливаются в газовых и паровых турбинах вместо стандартных лабиринтных уплотнений с общей целью повышения коэффициента полезного действия установки. Обзор технологии щёточных уплотнений приведён в работе [9].

Стандартная конструкция щёточного уплотнения включает в себя щёточный пакет, защитное и упорное кольца. Пакет уплотнения составлен из большого числа волокон малого диаметра, плотно упакованных и расположенных под углом в окружном направлении. Одним из основных параметров пакета щёточного уплотнения является пористость ϵ — отношение пустого объёма между волокнами к полному объёму пакета. Пористость щёточного пакета толщиной в осевом направлении b_b , собранного из волокон диаметра d , расположенных под углом ϕ , с плотностью упаковки N определяется из геометрических соображений как

$$\epsilon = 1 - \frac{\pi d^2 N}{4b_b \cos \phi}, \quad (1)$$

где N — число волокон в пакете на метр в окружном направлении.

Оценка расходной характеристики щёточного уплотнения представляет собой важную научно-техническую задачу, которую необходимо решать как при проектировании уплотнений, так и при составлении общей модели двигательной установки.

Для стандартных лабиринтных уплотнений существует большое разнообразие инженерных формул для приближённой оценки расхода. Для щёточных уплотнений общей методики, позволяющей оценить расход, не существует. Это связано с конструкцией щёточного уплотнения и с более сложными закономерностями его работы. Простейшим подходом для учёта расходной характеристики щёточного уплотнения в общей модели двигателя является замена щёточного уплотнения в модели эквивалентным лабиринтным уплотнением.

При расчётах пакет щёточного уплотнения часто рассматривается как пористая среда. Такое представление может быть использовано для построения подходов к определению расхода через контактные щёточные уплотнения, устанавливаемые с нулевым номинальным зазором или внахлест. В работе [1] был представлен подобный полуэмпирический подход для оценки расхода на основании параметра эффективной толщины щёточного пакета.

В работе [8], посвящённой материалу металло-резина, была приведена простая полуэмпирическая

методика оценки расхода через пористый материал, которая также может быть применена к щётчным уплотнениям. Выражения для расхода выводятся из следующего уравнения для перепада давления:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{76,5(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d^2} \mu V + \frac{0,71(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d} \rho V^2, \quad (2)$$

где V — среднерасходная скорость; μ — динамическая вязкость; ρ — плотность.

Уравнение (2) является известной зависимостью Кармана—Козени для проницаемости в пористой среде [3], в котором значения коэффициентов проницаемости немного отличаются от хорошо известных выражений Эргуна [2].

В приложении к контактным щётчным уплотнениям массовый расход через пористый материал может быть рассчитан при ламинарном и турбулентном режимах с помощью формул

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{лам}} &= \rho AV = \frac{\varepsilon^3 \rho \Delta p A d^2}{76,5 \mu b_b (1-\varepsilon)^2}; \\ \dot{m}_{\text{турб}} &= \rho AV = A \sqrt{\frac{\varepsilon^3 \rho \Delta p d}{0,71 b_b (1-\varepsilon)}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где A — площадь сечения с открытой щёткой (площадь сечения между валом и внутренним диаметром упорного кольца).

В работе [8] было сделано допущение, что при ламинарном режиме доминирует вязкостное сопротивление, тогда как в турбулентном режиме доминирует инерционное сопротивление. Основная трудность в использовании приведённой оценки заключается в определении реального значения толщины щётчного пакета b_b , которое зависит от перепада давления через уплотнение.

Базовые щётчные уплотнения

Предложенная инженерная методика для оценки расхода через типичное щётчное уплотнение на основе ограниченного массива экспериментальных данных была первоначально представлена в работе [4]. Методика включает в себя четыре схемы щётчных уплотнений, которые были протестированы в разное время на кафедре энергетических систем Мюнхенского технического университета.

Схемы конструкций щётчных уплотнений, которые в рамках данной методики называются базовыми, приведены на рис. 1. Четыре конфигурации (Щ-1, Щ-2, Щ-3 и Щ-4) различаются прежде

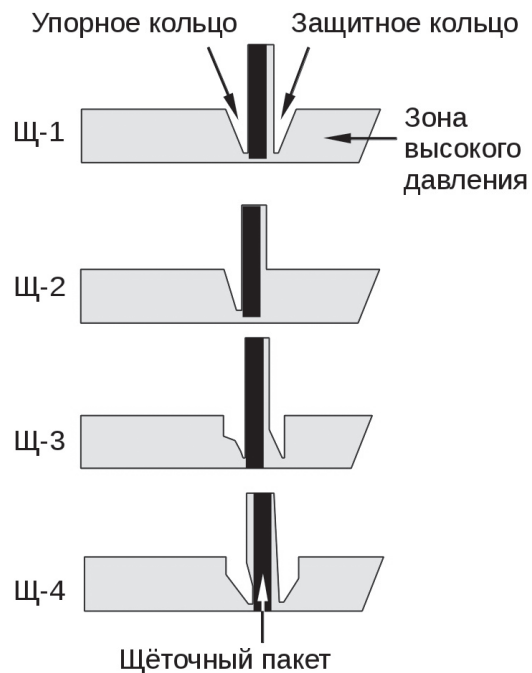


Рис. 1. Схемы базовых щётчных уплотнений

всего геометрией защитного и упорного колец. В схеме Щ-2 защитное кольцо фактически отсутствует. В конфигурациях Щ-1, Щ-2 и Щ-3 предполагается, что щёточный пакет прилегает к упорному кольцу по всей длине. В конфигурации Щ-4 между пакетом и упорным кольцом существует полость.

Параметры базовых уплотнений сведены в табл. 1. Рассматриваются шесть различных щётчных пакетов (схема Щ-2 представлена тремя пакетами). Все пакеты изготовлены из металлической микропроволоки Naipes 25. Волокна в схеме Щ-3 закрепляются с помощью сварного соединения, в остальных случаях — с помощью механического крепления. Уплотнения Щ-3 и Щ-4 имеют нулевой радиальный зазор, другие уплотнения собираются с положительным номинальным зазором. Следующими важными отличиями щётчных пакетов являются диаметр проволоки и плотность упаковки.

Последняя строка в табл. 1 содержит теоретические значения минимальной толщины пакета при максимальном сжатии, рассчитанные из геометрических соображений по следующей формуле [5]:

$$b_b^{\min} = d + \frac{\sqrt{3}d}{2} \left(\frac{dN}{\cos \varphi} - 1 \right). \quad (4)$$

Обобщённые экспериментальные расходные характеристики базовых щётчных уплотнений приведены на рис. 2. Значения расхода даны в терминах эффективного радиального зазора, который рассчитывается по формуле [6]

Таблица 1

Параметры базовых щёточных уплотнений

Щёточные уплотнения	Щ-1	Щ-2А	Щ-2Б	Щ-2В	Щ-3	Щ-4
Номинальный радиальный зазор, мм	0,31	0,21	0,21	0,21	0,00	0,00
Диаметр проволоки, мм	0,070	0,070	0,070	0,150	0,168	0,150
Плотность упаковки, шт/мм	200,00	200,00	200,00	50,00	47,64	50,00
Угол наклона, ...°	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0
Длина волокна, мм	15,00	10,0	15,00	15,00	15,00	15,00
Толщина пакета, мм	2,0	1,98	1,88	1,88	2,0	2,0
Радиальный зазор кольца, мм	1,08	1,42	1,42	1,42	1,2	1,2
Диаметр вала, мм	180,05	179,98	179,98	179,98	179,86	179,86
Минимальная толщина пакета, мм	1,21	1,21	1,21	1,40	1,66	1,40

$$h^{eff} = \frac{\dot{m}\sqrt{T_0}}{\pi p_0 D_r Q};$$

$$Q = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{R_s(\gamma-1)} \left[\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \frac{p_0}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}; \\ \sqrt{\frac{\gamma}{R_s} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, & \frac{p_0}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \end{cases} \quad (5)$$

где p_0 и T_0 — давление и температура воздуха на входе в уплотнение; p_1 — давление на выходе из уплотнения; D_r — диаметр вала; R_s — удельная газовая постоянная; γ — показатель адиабаты.

На рис. 2 представлены осреднённые зависимости эффективного зазора от перепада давления через щёточный пакет. Вертикальные отрезки демонстрируют разброс экспериментальных данных, который обусловлен в первую очередь эффектом гистерезиса.

Экспериментальные значения эффективного зазора в зависимости от перепада давления аппроксимируются с помощью следующей функции:

$$h^{eff} = f(\bar{p}) = m_1 \bar{p}^{m_2} + m_3. \quad (6)$$

Ряд базовых щёточных уплотнений имеют положительный номинальный радиальный зазор. Экспериментальные данные по закрытию свободного зазора при возникновении перепада давления

через уплотнения Щ-1 и Щ-2 приведены на рис. 3. Данные для конфигурации Щ-2В разделяются на начальные измерения (Щ-2В-0) и повторные измерения после завершения всех экспериментальных исследований (Щ-2В-1). Безразмерные значения зазора представляют собой отношение фактического радиального зазора к зазору упорного кольца. Экспериментальные данные были получены с помощью фотокамеры и последующей обработки снимков.

Экспериментальные значения безразмерного свободного зазора в зависимости от перепада давления аппроксимируются с помощью следующей функции:

$$\bar{h} = f(\bar{p}) = h_1 e^{h_2 \bar{p}} + h_3 e^{h_4 \bar{p}}. \quad (7)$$

Коэффициенты аппроксимационных зависимостей для эффективного зазора и безразмерного свободного зазора, полученные с использованием метода наименьших квадратов, сведены для базовых щёточных уплотнений в табл. 2.

Экспериментальные данные, представленные выше, дополнены расчётными зависимостями по изменению толщины щёточного пакета в осевом направлении при возникновении перепада давления. Зависимости были получены с помощью аэродинамической модели на основе методов вычислительной гидродинамики, описывающих течение воздуха в щёточном уплотнении [10] (см. также ниже).

Пакет уплотнения рассматривается как пористая среда. При этом значения толщины пакета определялись путём калибровки модели пористой среды для каждого значения давления с использованием экспериментальных данных по расходу и

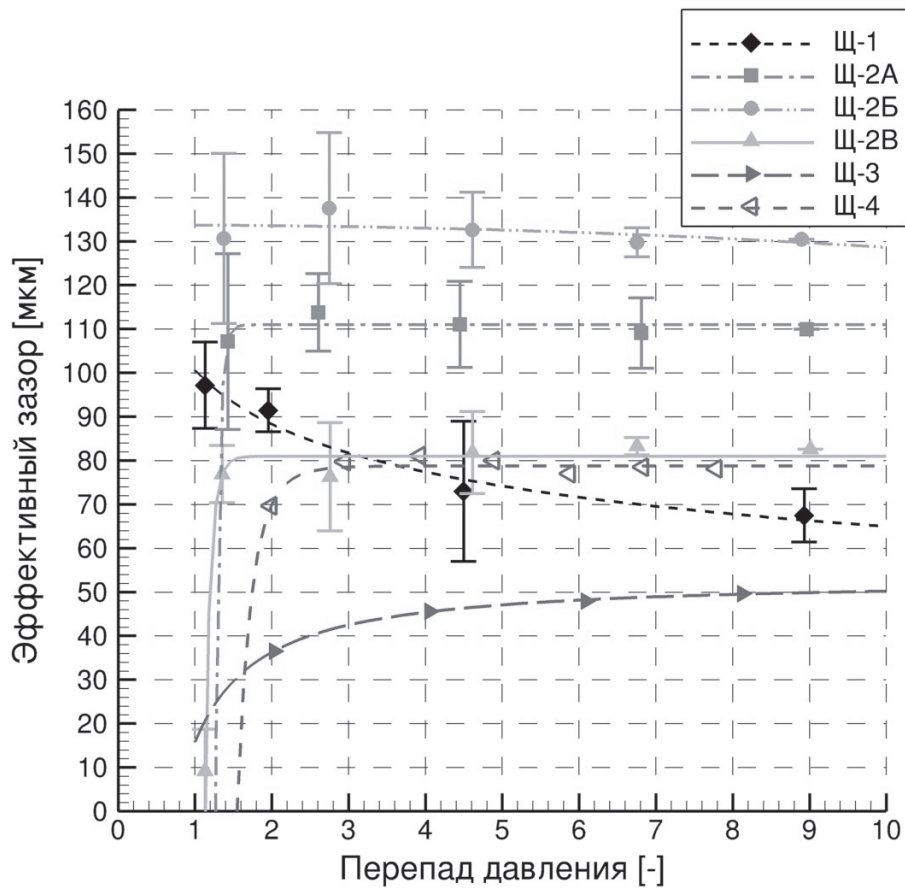


Рис. 2. Экспериментальные расходные характеристики базовых уплотнений

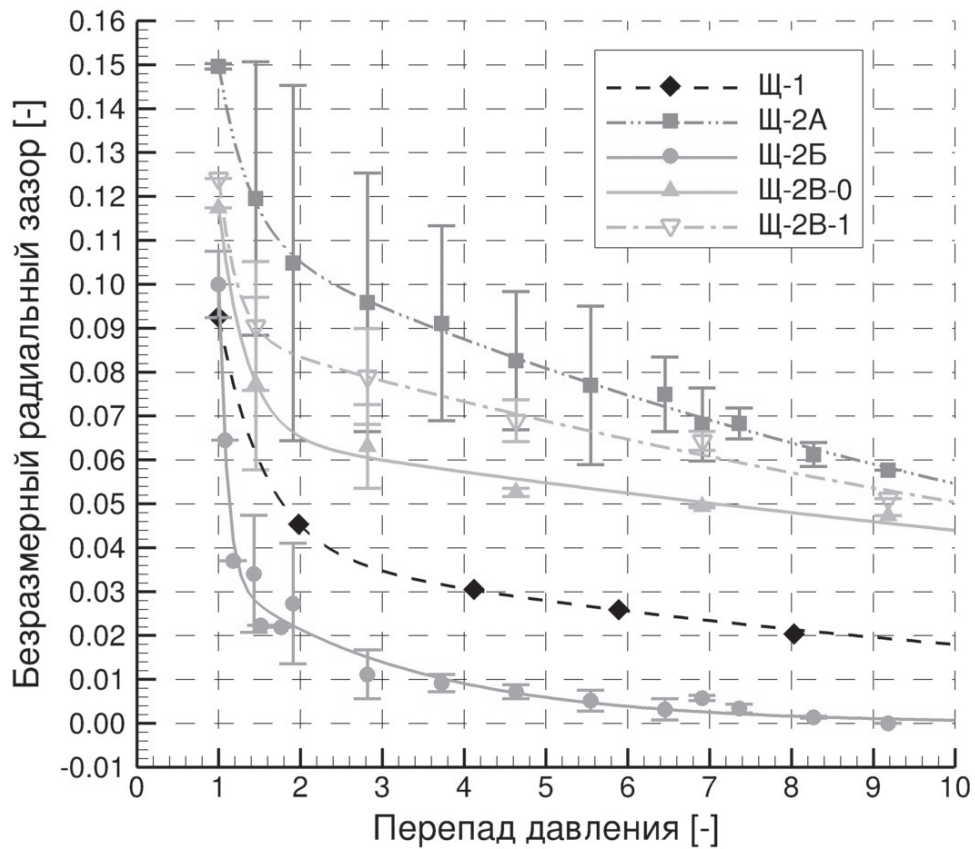


Рис. 3. Экспериментальный свободный радиальный зазор базовых уплотнений

Таблица 2

Коэффициенты регрессии экспериментальных зависимостей

	Щ-1	Щ-2А	Щ-2Б	Щ-2В-0	Щ-2В-1	Щ-3	Щ-4
Эффективный зазор [мкм]							
m_1	103,5	-7919,0	-0,03643	-508,1	-508,1	-36,94	-3290,0
m_2	-0,1835	-27,91	2,149	-15,88	-15,88	-1,167	-8,549
m_3	-2,883	111,0	133,7	81,0	81,0	52,72	78,78
Безразмерный радиальный зазор [-]							
h_1	0,3212	0,5602	0,06776	1,011	3,299	—	—
h_2	-1,804	-2,663	-10,03	-2,966	-4,526	—	—
h_3	0,04337	0,1198	0,03287	0,06828	0,09412	—	—
h_4	-0,08823	-0,0786	-0,4287	-0,04407	-0,06252	—	—

свободному радиальному зазору, приведённых выше. Расчётные значения толщин щёточных пакетов приведены на рис. 4.

выбирается наиболее близкий тип базового щёточного уплотнения из табл. 1 и рис. 3. При этом сравниваются в первую очередь такие параметры, как номинальный радиальный зазор, диаметр проволо-

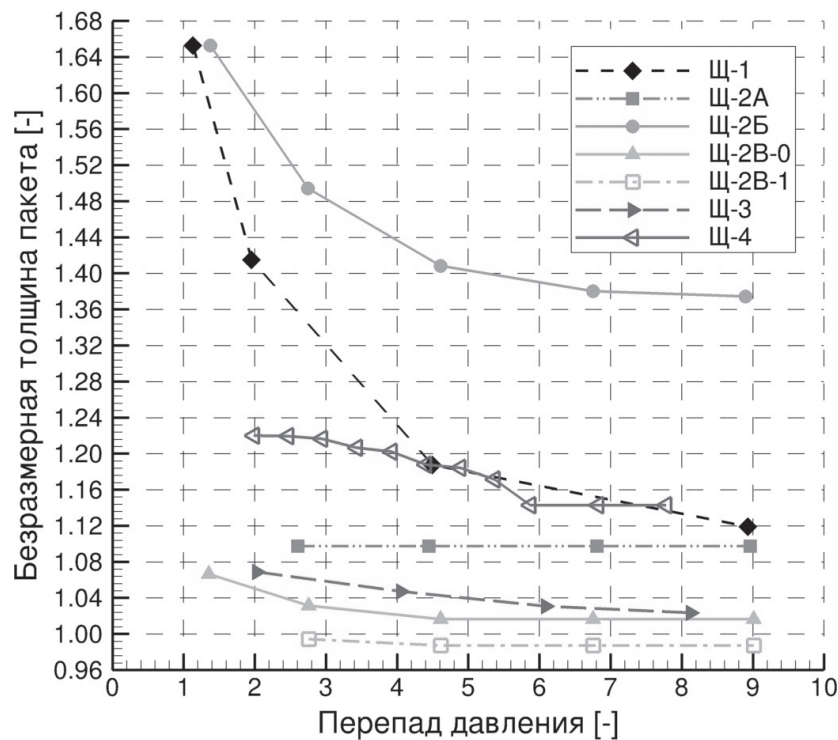


Рис. 4. Расчётные зависимости сжатия щёточного пакета базовых уплотнений

Инженерный подход для оценки расхода через щёточное уплотнение

Приведённые выше аппроксимационные зависимости позволяют сформулировать подход к оценке расхода через типичное щёточное уплотнение, состоящий из трех шагов.

Вначале на основе параметров уплотнения, для которого необходимо провести оценку расхода,

ки, радиальный зазор упорного кольца, геометрия упорных и защитных колец.

Затем с помощью аппроксимационных зависимостей, приведенных на рис. 2 и в табл. 2, определяется значение эффективного зазора для заданного перепада давления.

Фактический расход через анализируемое щёточное уплотнение определяется пересчётом по следующей формуле (см. (5)):

$$\dot{m} = \frac{\pi p_0 D_r Q}{\sqrt{T_0}} h^{eff}. \quad (8)$$

В работе [4] приведен ряд примеров по использованию предложенного инженерного подхода для различных щёточных уплотнений. Сравнительный анализ с данными, взятыми из литературы, показал удовлетворительное согласование оценочных значений расхода с экспериментальными значениями.

ВГД-модель для автоматизированного расчёта щёточного уплотнения

Детальный расчёт течения газа через щёточное уплотнение может быть проведён с использованием упрощённой аэродинамической модели уплотнения на основе методов вычислительной гидродинамики (ВГД) и модели пористой среды.

Отличительной особенностью представленной ВГД-модели является тот факт, что модель полностью (включая генерацию расчётной сетки) реализована в свободно распространяемом ВГД-пакете с открытым кодом OpenFOAM (www.openfoam.org). Разработанная в OpenFOAM модель представляет собой инструмент, с помощью которого с относительно небольшими временными и вычислительными затратами можно выполнить аэродинамический расчёт щёточного уплотнения и определить его расходную характеристику. В простейшем случае от пользователя требуется ввести лишь основные параметры уплотнения (диаметры, параметры проволоки, перепад давления). Генерация расчётной сетки выполняется автоматически с помощью модуля blockMesh. Расчёт выполняется с помощью решателя rhoPorousSimpleFoam. Анализ результатов осуществляется в оболочке paraFoam.

Принципиальная схема расчётной модели трёхмерного сегмента щёточного уплотнения показана на рис. 5. Модель включает в себя полную систему уравнений Навье—Стокса для сжимаемого газа, осредненных по Рейнольдсу. Система уравнений замыкается двухпараметрической моделью турбулентности SST, которая является комбинацией моде-

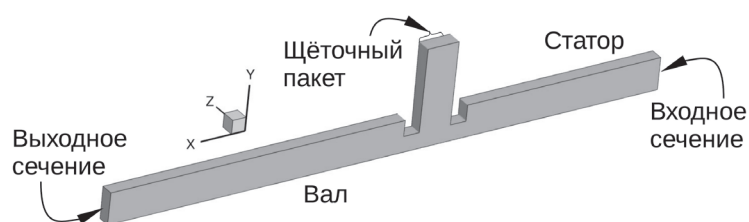


Рис. 5. Схема расчётной модели сегмента щёточного уплотнения

лей (k-ε) и (k-ω). Воздух рассматривается как идеальный газ. В качестве граничных условий на входном и выходном сечениях задаётся перепад давления. На гранях сегмента задаются периодические условия.

Пакет щёточного уплотнения моделируется как пористая среда. Данный подход не учитывает дискретную природу волокон в пакете, тем самым значительно упрощая моделирование щёточного уплотнения.

Анизотропная модель пористой среды описывает зависимость градиента давления от скорости среды, протекающей через пористую структуру:

$$-\frac{\partial p}{\partial i} = a_i \mu v_i + b_i \rho |v_i| v_i, \quad i = x, y, z, \quad (9)$$

где v — скорость; коэффициенты сопротивления определяются как [7]:

$$a_{n,z} = 72\tau C; \quad a_s = \frac{6}{5}\tau C; \quad C = \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3 d^2};$$

$$b_{n,z} = \frac{1}{2}\tau \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) D; \quad b = 0; \quad D = \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3 d}. \quad (10)$$

Параметр извилистости τ и коэффициент относительной заполненности β рассчитываются с помощью следующих выражений [7]:

$$\tau = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{\epsilon-1} + \beta \sqrt{\epsilon-1} \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon-1}} - 1 \right)^2 + \frac{1}{4}} \right),$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \sqrt{\epsilon-1}}. \quad (11)$$

Применение описанных подходов в практических расчётах

В данной работе предложенные подходы к определению расходных характеристик щёточных уплотнений применяются к оригинальным щёточным уплотнениям, изготовленным на ГП «Ивченко-Прогресс» (см. [11, 12]).

Параметры уплотнений, а также экспериментальные значения расхода для отдельных перепадов давлений сведены в табл. 3. Расход представлен в приведенном виде

$$G_{пр} = \frac{\dot{m} \times 1000}{p_0 / 98100} \sqrt{T_0}, \quad (12)$$

где \dot{m} — полный расход через уплотнение в кг/с; p_0 — давление перед уплотнением в Па; T_0 — номинальная температура в К.

Все уплотнения имеют номинальный радиальный зазор, основные отличия — в диаметре уплотнений и плотности упаковки волокон. Следует отметить также номинальные толщины щёточных пакетов, значения которых меньше теоретических минимальных значений, рассчитанных по формуле (4). Это может говорить о том, что конструкция и технология изготовления данных щёточных уплотнений отличаются от коммерчески доступных аналогов.

Для инженерной оценки расхода через уплотнения, представленные в табл. 3, могут быть рассмотрены базовые уплотнения Щ-1, Щ-2А и Щ-2Б (см. табл. 1). Для дальнейшей работы было выбрано базовое уплотнение Щ-2Б, которое демонстрирует при относительно высоких значениях расходной характеристики практически полное закрытие свободного зазора. На основе выбранного базового уплотнения были также проведены автоматизированные ВГД-расчёты для реальной геометрии исследуемых уплотнений.

Результаты оценки расхода с помощью инженерной и ВГД-методик сведены в табл. 4. Инженерная методика демонстрирует удовлетворительное согласование с экспериментальными значениями для уплотнений 1, 3 и 4. Значительное расхождение наблюдается для уплотнения 2 при перепаде давления 2,0. Помимо прочих факторов, такое расхождение также связано с общей неопределённостью относительно состояния щёточного пакета при малых перепадах давления.

ВГД-расчёты в общем случае не улучшили оценку расхода через исследуемые уплотнения. Также имеет место удовлетворительное согласование с экспериментом для уплотнений 1, 3 и 4. Однако ВГД-методика, в отличие от инженерной оценки, чаще выдаёт более высокие значения по сравнению с экспериментальными данными.

Значительные расхождения между расчётными и экспериментальными значениями расхода для уплотнения 2 указывают на то, что поведение уплотнения 2 заметно отличается от поведения базового

Таблица 3

Параметры щёточных уплотнений для оценки расхода

Щёточное уплотнение	1	2		3	4
Фактический диаметр вала, мм	89,994	333,476		207,465	391,447
Фактический радиальный зазор, мм	0,212	0,220		0,218	0,217
Диаметр проволоки, мм	0,07	0,07		0,07	0,07
Плотность упаковки, шт/мм	160	240		240	240
Наклон волокон, ...°	45	45		45	45
Длина волокон, мм	9,30	9,25		9,30	9,25
Номинальная толщина пакета, мм	0,8	1,2		1,2	1,2
Радиальный зазор кольца, мм	1,5	1,5		1,0	1,5
Давление за уплотнением, МПа	0,1	0,1		0,1	0,1
Перепад давления	5,66	2,0	5,0	4,0	3,0
Экспериментальный расход $G_{пр}$, (г/с)/кгс/см ² К ^{0,5}	158	360...390	440...460	390	700

Таблица 4

Результаты оценки расхода на основе базового уплотнения Щ-2Б

Щёточное уплотнение	1	2		3	4
Перепад давления	5,66	2,0	5,0	4,0	3,0
Экспериментальный расход, (г/с)/кгс/см ² К ^{0,5}	158	375	450	390	700
Оценка расхода, (г/с)/кгс/см ² К ^{0,5}	148,2	221,9	550,5	343,6	650,0
Расхождение с экспериментом	-6,2%	-40,8%	22,3%	-11,9%	-7,2%
Расход по ВГД-расчёту, (г/с)/кгс/см ² К ^{0,5}	164,2	658,1	577,2	310,9	739,5
Расхождение с экспериментом	4,0%	75,5%	28,3%	-20,3%	5,7%

вого уплотнения Щ-2Б. Поэтому для уплотнения 2 были проведены дополнительные расчёты на основе базового уплотнения Щ-2А. Результаты сведены в табл. 5. Для малого перепада давления значительные расхождения с экспериментом остались, однако для ВГД-расчёта расхождение заметно уменьшилось по сравнению с ВГД-расчётом на основе уплотнения Щ-2Б. Для перепада давления 5,0 обе методики демонстрируют в данном случае хорошее согласование с экспериментом.

гласование может быть достигнуто для конструкций щёточных уплотнений, значительно отличающихся от конструкций базовых уплотнений, составляющих основу предложенных подходов.

Благодарность

Автор выражает благодарность С.Б. Резнику (ГП «Ивченко-Прогресс», гор. Запорожье, Украина) за предоставление экспериментальных данных для щёточных уплотнений, спроектированных и изготовленных на базе ГП «Ивченко-Прогресс».

Таблица 5

Результаты оценки расхода на основе базового уплотнения Щ-2А

Щёточное уплотнение	2	
	Перепад давления	2,0
Экспериментальный расход, (г/с)/кгс/см ² К ^{0,5}	375	450
Инженерная оценка расхода, (г/с)/кгс/см ² К ^{0,5}	184,4	461,0
Расхождение с экспериментом	-50,8%	2,45%
Расход по ВГД-расчёту, (г/с)/кгс/см ² К ^{0,5}	495,2	442,2
Расхождение с экспериментом	32,1%	-1,7%

Выводы

Предложенные в статье упрощённые подходы представляют собой практические инструменты для оценки расходных характеристик щёточных уплотнений без значительных временных затрат.

В основе инженерного подхода лежат экспериментальные данные по эффективному зазору и эффекту закрытия свободного зазора для шести различных конфигураций щёточных уплотнений. Набор экспериментальных данных дополняется расчётными зависимостями сжатия щёточного пакета, определёнными с помощью калибровки модели пористой среды.

Несмотря на ограниченный набор базовых уплотнений, предложенный инженерный подход демонстрирует удовлетворительное согласование с данными для других уплотнений, найденными в открытой литературе (см. [4]). Упрощённая ВГД-модель щёточного уплотнения, разработанная в пакете OpenFOAM с использованием модели пористой среды, используется для определения давлений и картин течения в каналах уплотнения. Разработанная методика позволяет проводить расчёты для реальной геометрии уплотнения в автоматизированном режиме, заметно упрощая процесс моделирования методами ВГД.

Использование предложенных методик проиллюстрировано для оригинальных конструкций щёточных уплотнений ГП «Ивченко-Прогресс». Результаты показывают, что удовлетворительное со-

Библиографический список

1. Chupp R.E., Holle G.F. Generalizing circular brush seal leakage through a randomly distributed bristle bed // Journal of Turbomachinery. 1996. Vol. 118. Pp. 153-161.
2. Ergun S. Fluid flow through packed columns // Chemical Engineering Progress. 1952. Vol. 48. Pp. 89-94.
3. Kaviany M. Principles of heat transfer in porous media. 2nd ed. Springer-Verlag New York Inc., 1991. XX, 626 p.
4. Pugachev A.O. Aggregation of experimental and theoretical data for brush seal leakage evaluation // Proceedings of the 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 2014. Paper AIAA 2014-3598.
5. Pröstler S. Modellierung und numerische Berechnung von Wellenabdichtungen in Bürstenbauart. Doctoral Thesis, University of Bochum, Germany: Ruhr-Universität Bochum, 2005.
6. Trutnovsky K. Berührungsfreie Dichtungen. — Düsseldorf: VDI-Verlag, 1973.
7. Wu J., Yu B., Yun M. A resistance model for flow through porous media // Transport in Porous Media. 2008. Vol. 71. Pp. 331-343.
8. Белоусов А.И., Изжеуров Е.А., Сетин А.Д. Исследование гидродинамических и фильтровальных характеристик пористого материала МР // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Куйбышев: КуАИ. 1975. № 2 (73). С. 71-80.

9. Пугачев А.О., Равикович Ю.А. Применение щётчных уплотнений в конструкциях современных турбомашин // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 67-75.
10. Пугачев А.О. Расчёт расходной характеристики щётчных уплотнений с использованием модели пористой среды // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 2 (41). С. 24-32.
11. Рублевский Ю.В., Доценко В.Н. Опыт применения щётчных уплотнений для улучшения параметров авиационных ГТД и стационарных энергоустановок // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2012. № 8. С. 45-49.
12. Пейчев Г.И. и др. Сравнительный анализ щётчного и лабиринтного уплотнений ГТД // Вісник двигунобудування. 2009. № 1. С. 66-70.

SIMPLIFIED APPROACHES TO BRUSH SEAL LEAKAGE EVALUATION

Pugachev A.O.

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia
e-mail: pugachev@tum.de*

Abstract

The paper presents semi-empirical and theoretical methods for brush seal leakage performance evaluation. It also describes suggested simplified approach based on the reevaluation of the effective clearance value for the selected generic brush seal of the design that corresponds most closely to the studied seal. Besides, the paper describes the simplified CFD-based porous medium model of the gas flow in brush seal developed in free and open source software, allowing performing the analysis in automated mode. The proposed simplified approaches are practical tools for evaluating leakage performance of brush seals without excessive time consumption. The preliminary design approach is based on the experimental data on leakage and blow-down behavior of six different configurations of brush seals. Experimental dataset is supplemented by the predicted calculated relationships for the brush pack compression. In spite of the limited set of the generic brush seals, the proposed preliminary design approach demonstrates a satisfactory agreement with the data for other brush seals taken from free access literature. The simplified CFD model is used to obtain pressure and flow fields in the brush seal channels. The application of the proposed approaches is illustrated using the data on the original design of brush seals developed at IVCHENKO-PROGRESS SE. The results show that a reasonable agreement can be achieved for the brush seals of that differ significantly from the designs of brush seals forming the basis of suggested approaches.

Keywords: brush seal, discharge characteristic, engineering approach, experimental data, computational fluid dynamics.

References

1. Chupp R.E., Holle G.F. Generalizing circular brush seal leakage through a randomly distributed bristle bed. *Journal of Turbomachinery*. 1996, vol. 118, pp. 153-161.
2. Ergun S. Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, 1952, vol. 48, pp. 89-94.
3. Kaviany M. *Principles of heat transfer in porous media*. Springer-Verlag New York Inc., 1991, 626 p.
4. Pugachev A.O. Aggregation of experimental and theoretical data for brush seal leakage evaluation. *Proceedings of the 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2014. Paper AIAA 2014-3598.
5. Pröstler S. *Modellierung und numerische Berechnung von Wellenabdichtungen in Bürstenbauart*. Doctoral Thesis, Ruhr-Universität Bochum, Germany, 2005, 133 p.
6. Trutnovsky K. *Berührungsfreie Dichtungen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1973, 312 p.
7. Wu J., Yu B., Yun M. A resistance model for flow through porous media. *Transport in Porous Media*, 2008, vol. 71, pp. 331-343.
8. Belousov A.I., Izzheurov E.A., Setin A.D. *Vibracionnaja prochnost' i nadezhnost' dvigatelej i sistem letatel'nyh apparatov*. *Sbornik statei*, Kuibyshev, 1975, no. 2 (73), pp. 71-80.
9. Pugachev A.O., Ravikovich Y.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no.3. pp. 67-75.
10. Pugachev A.O. *Mir transporta i technologicheskikh mashin*, 2013, no. 2 (41), pp. 24-32.
11. Rublevskij Y.V., Docenko V.N. *Vestnik Natsional'noo tekhnicheskogo universiteta "KhPI". Energeticheskie i teplotekhnicheskije protsessy i oborudovanie*, 2012, no. 8, pp. 45-49.
12. Peichev G.I. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2009, no. 1, pp. 66-70.