

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ В ТУРБИНЕ ДВИГАТЕЛЯ Д-27

Ю.В. Рублевский, Е.А. Бандурко, Ю.А. Зеленый, А.Е. Занин,

Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» им. А.Г. Ивченко,

г. Запорожье, Украина

На протяжении всей истории создания газотурбинных двигателей актуальной была задача повышения эффективности его узлов. Одним из направлений решения этой задачи всегда оставался вопрос снижения паразитных утечек воздуха, отбираемого в компрессоре для нужд турбины (охлаждение, создание перепадов давлений в опорах, компенсация осевого усилия на подшипники). Снижение утечек достигается за счет совершенствования уплотнений. До настоящего времени в газотурбостроении основным видом уплотнения между статорными и роторными узлами являются лабиринты (различные по конструкции и по эффективности), величина утечек через которые зависит от многих факторов, а именно: конструктивного исполнения, величины радиального зазора, количества и геометрии гребешков, динамики взаимных перемещений ротора и статора, особенностей работы энергоустановки, технологии изготовления [1].

Ведущие мировые разработчики авиационных и стационарных газотурбинных двигателей (ГТД) затрачивают значительные усилия на разработку, испытания и внедрение более эффективных уплотнений, одними из которых являются щеточные уплотнения.

Имеется целый ряд научно-исследовательских работ по разработке и внедрению щеточных уплотнений.

НАСА выполнено сравнение эффективности лабиринтного и щеточного уплотнений за компрессором на двигателе YТ-700 [2].

Щеточные уплотнения представляют собой кольцевую щетку из металлических проволочек малого диаметра из сплавов на основе никеля, хрома, кобальта, вольфрама или неметаллических волокон. Проволочки располагаются под углом к сопрягаемой по-

верхности ротора в целях уменьшения трения волокон щеточного уплотнения о роторную деталь.

Зарубежные информационные источники говорят об отработке и проверке работоспособности и эффективности таких уплотнений на фирмах «Ролс-Ройс», «Дженерал Электрик», Сименс, Мицубиси, Вестенхауз и ряде других фирм, занимающихся разработкой и эксплуатацией стационарных ГТД [3].

В настоящей работе представлено прямое сравнение эффективности щеточных и лабиринтных уплотнений на турбине двигателя Д-27, в системе компенсации осевого усилия (КОУ) турбины винтовентилятора (ТВВ).

Условия работы системы уплотнений: обороты ротора ТВВ 8440 об/мин, линейные скорости в уплотнениях до 160 м/с, давление воздуха в разгрузочной полости 710 кПа, температура 420 °С.

Для оценки эффективности исследуемых щеточных уплотнений выполнялась специальная препарировка для замера давления в полости КОУ и для замера давлений и температур воздуха в трубопроводе подвода воздуха на компенсацию осевого усилия (для определения расхода воздуха). Препарированный трубопровод подвода воздуха перед постановкой на двигатель проходил специальную тарировку «холодной» продувкой в целях определения расходной характеристики. Детали в районе щеточного уплотнения препарировались датчиками ИМТК (измеритель максимальной температуры кристаллический) для определения температурного состояния.

Конструкция исходной системы лабиринтных уплотнений в полости КОУ и место замера давлений в полости представлены на рис. 1.

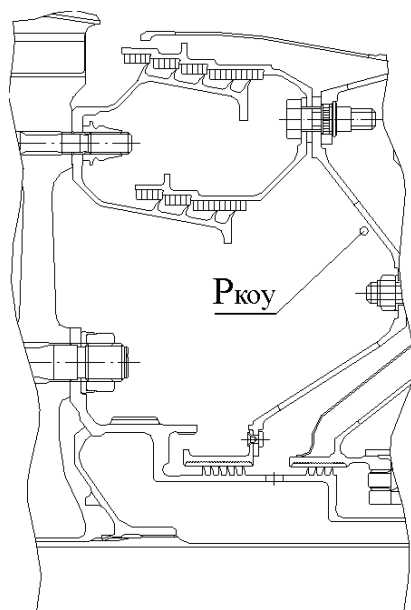


Рис. 1. Исходная система уплотнений КОУ TBV

На рис. 2 показаны зависимости давления в полости КОУ от приведенного давления за компрессором высокого давления (КВД) для исходной системы компенсации осевого усилия.

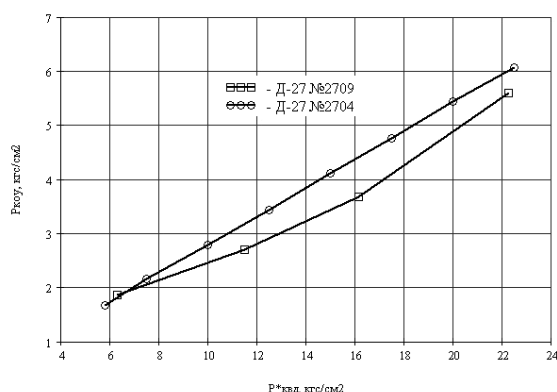


Рис. 2. Зависимость давления в полости КОУ в исходной системе от давления за КВД

Замеры давлений выполнялись на двух двигателях Д-27: № 2704 и № 2709.

В процессе доводки щеточных уплотнений было выполнено 3 сборки и испытания двигателя с различными конфигурациями роторных деталей щеточных уплотнений.

Конфигурация щеточных уплотнений в полости КОУ на двигателе при сборке № 1 представлена на рис. 3.

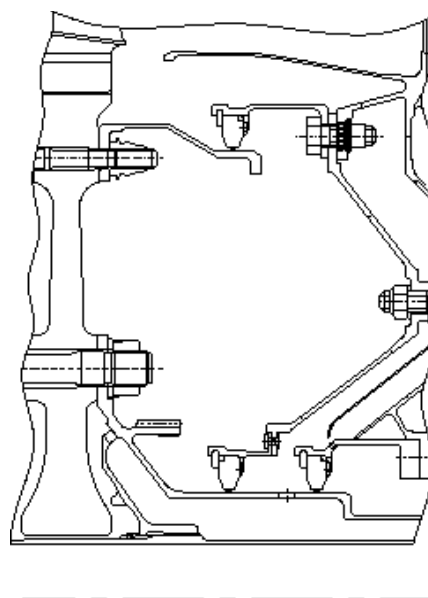


Рис. 3. Конструкция щеточного уплотнения при сборке № 1

Замеры давлений в полости КОУ при выполнении испытаний конструкции щеточных уплотнений, изображенной на рис. 3, приведены на рис. 4.

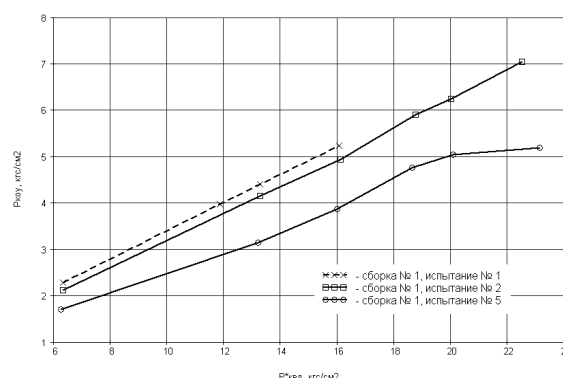


Рис. 4. Зависимость давления в полости КОУ от давления за КВД (сборка № 1)

Во время испытаний было отмечено падение давления в полости КОУ, после разборки двигателя и контроля ЛЮМ1-ОВ на роторном кольце верхнего щеточного уплотнения были обнаружены трещины, которые и явились причиной падения давления в полости КОУ. Вероятная причина появления этих трещин – аэроупругие колебания роторного кольца.

В целях устранения этого дефекта на сборку № 2 двигатель был собран с роторным кольцом, усиленным двумя буртами. Данная конструкция верхнего щеточного уплотнения представлена на рис. 5.

При проведении испытаний двигателя, собранного со щеточными уплотнениями, представленными на рис. 5, также было отмечено некоторое снижение давления в полости КОУ. Результаты замера давлений в полости КОУ приведены на рис. 6.

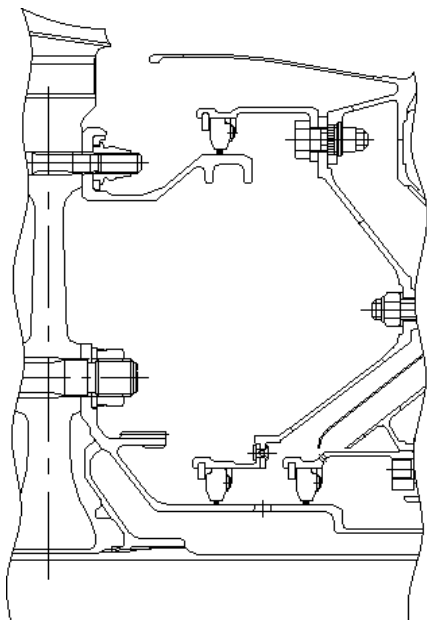


Рис. 5. Конструкция щеточного уплотнения при сборке № 2

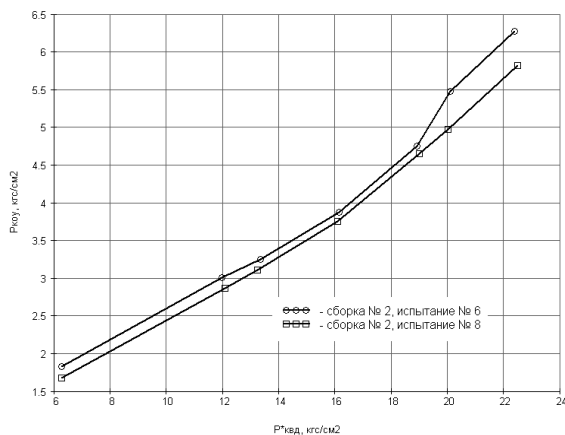


Рис. 6. Зависимость давления в полости КОУ от давления за КВД (сборка №2)

После разборки двигателя и контроля ЛЮМ1-ОВ на верхнем кольце опять были обнаружены трещины.

Дальнейшая модернизация узла щеточного уплотнения (сборка № 3) в полости КОУ представлена на рис. 7. Данная модернизация заключалась во введении в конструкцию роторного кольца с одним высоким буртом, расположенным в осевом направлении строго под щеточным уплотнением. Кроме того, кольцо крепления щеточного уплотнения на статоре дополнительно опи-

рается на корпус со стороны ротора (см. рис. 7).

После испытаний последней конструкции щеточного уплотнения (сборка № 3) при разборке двигателя и контроле ЛЮМ1-ОВ на роторном кольце трещин не обнаружено. Результаты замера давлений в полости КОУ приведены на рис. 8.

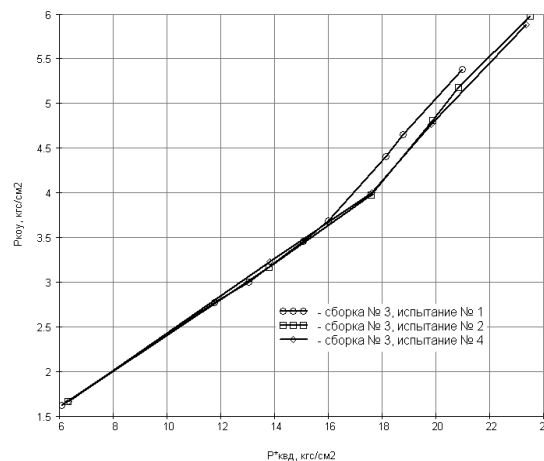


Рис. 7. Конструкция щеточного уплотнения при сборке № 3

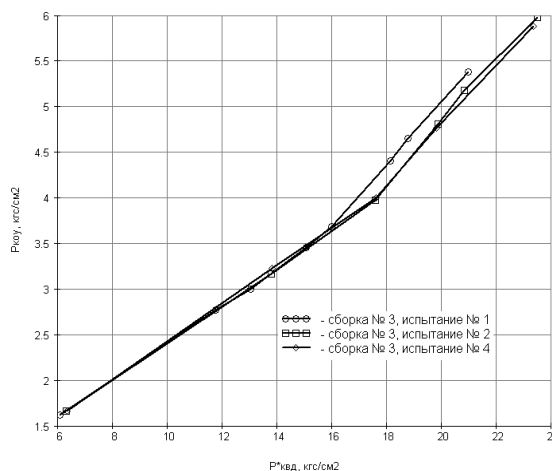


Рис. 8. Зависимость давления в полости КОУ от давления за КВД (сборка №3)

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что в процессе работы происходит приработка щеточных уплотнений, которая приводит к некоторому увеличению их пропускной способности, вследствие чего давление в полости КОУ снижается.

Относительный расход воздуха (отношение расхода воздуха, замеренное в трубе подвода, к расходу воздуха на входе в компрессор низкого давления (КНД)) на двигателях 2704, 2709 с лабиринтными уплотнениями составил 1,149...1,668%.

Расход воздуха, при работе со щеточными уплотнениями составлял величину порядка от 1,007 до 1,188%.

Расходы воздуха, замеренные при испытаниях, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расходы воздуха на КОУ для лабиринтных и щеточных уплотнений

Наименование уплотнительного элемента	Расход воздуха, кг/с	Расход воздуха, %
Лабиринт на дв.2704	0,492	1,668
Лабиринт на дв.2709	0,339	1,149
Щетки при сборке №1	0,308	1,028
Щетки при сборке №2	0,349	1,183
	0,347	1,172
Щетки при сборке №3	0,299	1,007
	0,320	1,094
	0,348	1,188

Температура щеточного кольца, замеренная датчиками ИМТК (измеритель максимальной температуры кристаллический) в процессе испытаний составляла порядка 410°С.

Давление в полости КОУ, замеренное в конце испытаний щеточных уплотнений, оказалось ниже на 0,05...0,50 кгс/см², по сравнению с замерами давлений на двигателях 2709 и 2704 с исходной конструкцией узла (лабиринты). В первом приближении щеточное уплотнение по эффективности примерно равнозначно двойному ступенчатому лабиринтному уплотнению с девятью гребешками.

Вероятной причиной появления трещин усталостного характера при малой наработке деталей является возбуждение резонансных явлений или автоколебательных процессов.

Для расчёта собственных частот колебаний роторных и статорных колец уплотнений использован циклосимметричный сектор деталей, не закреплённый и жёстко закреплённый по месту расположения болтовых соединений. Закрепление роторного кольца выполнено со стороны большего давления, а статорных колец - со стороны меньшего давления.

Расчеты показали отсутствие резонанса между роторными гармониками и собственными частотами колебаний роторных и статорных колец уплотнений. Резонансная диаграмма изображена на рис. 9.

Формы колебаний роторных колец из сборок 1 и 2 (рис. 3, 5) позволяют говорить о явлении подсоса газа

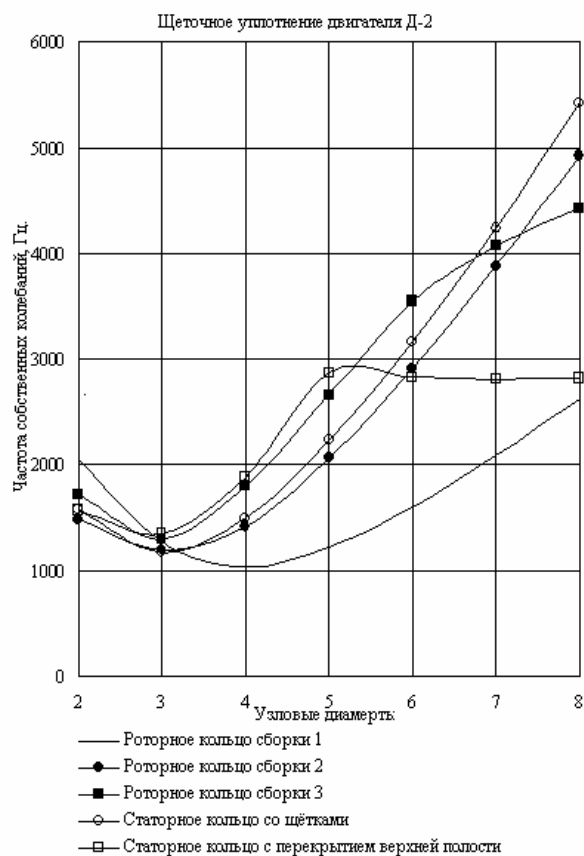


Рис. 9. Резонансная диаграмма деталей щеточного уплотнения двигателя Д-27

и возбуждении акустических колебаний под действием круговых волн давления в полости над роторным кольцом уплотнения. Возникающее при подсосе разрежение вызывает дополнительную силу, изгибающую кольцо и уменьшающую зазор между роторным и статорным кольцами, при этом подсос снижается, давление уменьшается и прогиб кольца уменьшается, это вновь вызывает увеличение подсоса и обуславливает дополнительную возможность колебания кольца.

Возбуждение акустических колебаний происходит в системе состоящей из двух подсистем: механической и акустической. Роторное кольцо выполняет роль затвора и при совпадении частоты колебаний механической системы и числа волн по окружности

акустической системы наступает акустический резонанс. Параметры акустической системы зависят от температуры, скорости вращения ротора и скорости вращения газа, который увлекается во вращение трением о ротор.

Существуют известные методы для устранения этого явления: отстройка от частоты акустического резонанса механической или акустической системы; увеличение акустического демпфирования; увеличение механического демпфирования; конструктивные изменения. Для устранения данного дефекта проведе-

ны изменения в конструкции деталей уплотнения.

Конструкция роторного кольца из сборки 3 (рис. 7) с одним высоким буртом под местом контакта со щеточным уплотнением такова, что зазор при колебаниях роторных и статорных колец стабилизирован, под местом контакта со щеточным уплотнением конструктивно организована узловая окружность. Наличие узловой окружности препятствует возникновению явления подсоса газа из КОУ в полость над роторным кольцом при колебаниях роторного кольца.

Изменённая конструкция статорного кольца уплотнения уменьшает массу газа в полости над роторным кольцом уплотнения и делает конструкцию более жёсткой.

Работоспособность конструкции щеточного уплотнения обеспечивается применением ротора ТВВ с кольцом, имеющим один высокий бурт под местом контакта со щетками и статором, в котором кольцо крепления щеточного уплотнения опирается на корпус (рис. 7).

В настоящее время продолжаются работы по дальнейшему обеспечению работоспособности и повышению эффективности щеточных уплотнений.

Литература

1. Скубачевский Г.С. Конструкция и расчет деталей газотурбинных двигателей: Уч. пособ.- М.: Машиностроение, 1981.- 550 с.
2. Relative Performance Comparison Between Baseline Labyrinth and Dual-Brush Compressor Discharge Seals in a YT-700 Engine Test / R.C. Hendricks, T.A. Griffin, T.R. Kline, K.R. Csavina, A. Pancholi D. Sood // NASA Technical Memorandum.-1994.- № 106360.- 23 p.
3. Steinetz B.M., Hendricks R.C. Engin Seal Technology Requirements to Meet NASA's Advanced Subsonic Technology Program Goals // AIAA-94-2698, Indianapolis, 1994.- 11 p

Поступила в редакцию 18.05.03

Рецензенты: Гл. констр. Г.Р. Крицын, ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, г. Запорожье; д-р. техн. наук. профессор С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.

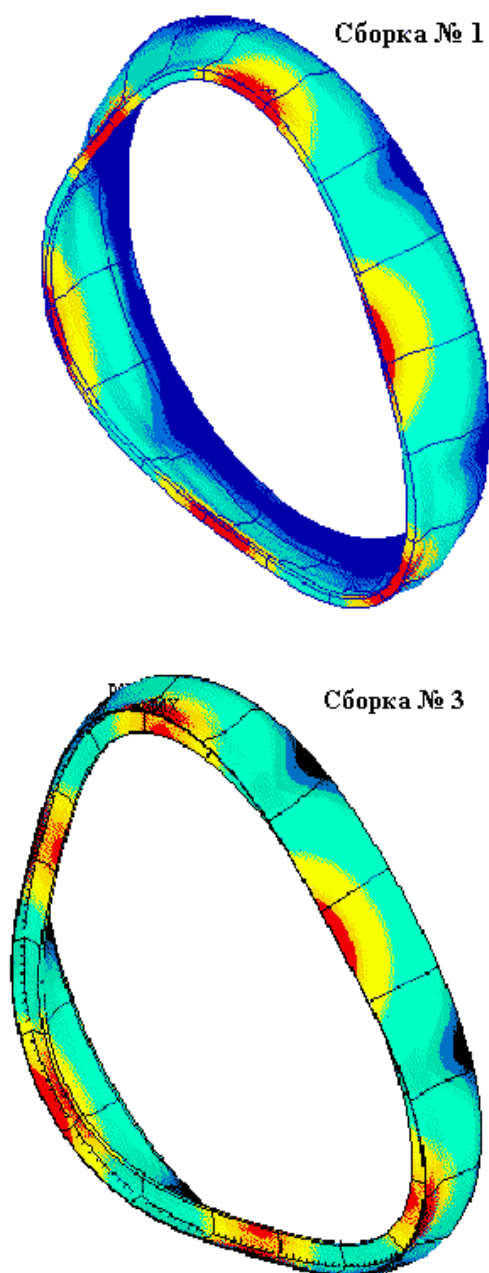


Рис. 10. Формы колебаний роторных колец щеточного уплотнения двигателя Д-27