

УДК 62-762.001

С.В. Фалалеев

*Самарский государственный аэрокосмический университет (национальный исследовательский университет), Россия*

## ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ГАЗО- И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ ДЛЯ ОПОР АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Конструирование, изготовление и эксплуатация уплотнений и уплотнительных систем требует обширных знаний. К уплотнениям авиационных двигателей предъявляются высокие требования. Газодинамические и гидродинамические уплотнения имеют широкие перспективы применения в авиационных двигателях. Основные проблемы: материалы, деформации колец, необходимость создания математических моделей сопряженных процессов. В статье описан принцип работы и изложен подход к проектированию торцовых уплотнений с газовой и жидкостной смазкой. Приведены характерные картины распределения давления в зазоре обоих типов уплотнений.*

**Ключевые слова:** торцовое газодинамическое уплотнение, торцовое гидродинамическое уплотнение, авиационный двигатель, утечки.

### Введение

Конструирование, изготовление и эксплуатация уплотнений и уплотнительных систем требует обширных знаний. Процессы в уплотнительных щелях определяются свойствами жидкостей и газов, теплопередачей и теплоотдачей, фазовыми изменениями, изнашиванием и коррозией, воздействием на подвижные части уплотнений сил и моментов, вибрационным состоянием и т.д. Очень часто эти определяющие величины так тесно связаны между собой, что кажется невозможным надежно рассчитать поведение уплотнительной системы в процессе эксплуатации. Но необходимо найти решение или доказать, что при предъявленных требованиях при существующем состоянии техники определенная уплотнительная проблема не решается. Для этого нужны знания и опыт. Все это в большой степени относится к авиа- и ракетостроению, ведущему классу технических систем, во многом определяющему развитие других отраслей машиностроения. Разработка новых двигателей сдерживается отсутствием доведенных высокоресурсных уплотнительных узлов, которые были бы работоспособны и в более жестких условиях эксплуатации. Конструирование и применение уплотнений в двигателях требует учета многих факторов, которые обычно не являются критическими для других областей техники.

Уплотнения ДЛА должны обеспечивать:

- заданную герметичность соединения в течение всего ресурса;
- минимально возможные трения, изнашивание и тепловыделение (при этом необходимо

исключить возможность взаимодействия продуктов изнашивания с уплотняемыми рабочими телами);

- функционирование узла после длительного хранения;
- работоспособность при взаимных осевых и радиальных перемещениях деталей статора и ротора во время работы ДЛА;
- технологичность изготовления и сборки элементов ДЛА.

Уплотнения опор работают в условиях значительных перепадов давления и температуры, что вызывает повышенные силовые и температурные деформации уплотнительных колец. Существенным фактором, влияющим на работу изделия, также является многорежимность двигателя. Уплотнения должны обеспечивать надежную работу двигателя на всех режимах его работы.

Постоянно повышающиеся требования к надежности, герметичности и весу уплотнений вызывают интерес к торцовым уплотнениям с газовой или жидкостной смазкой. Правильно спроектированное такое уплотнение должно работать без изнашиваемости пары трения с меньшей утечкой, чем радиально-торцовое уплотнение. В ряде случаев торцовые бесконтактные уплотнения имеют меньшие утечки, чем торцовые контактные уплотнения. В особенности при очень высоких скоростях вращения роторов таким уплотнениям не имеется альтернативы. Гарантированная газовая или жидкостная пленка в зазоре торцового уплотнения создается с помощью микроканалов. Многолетний опыт эксплуатации торцовых уплотнений с газовой смаз-

кой, разработанных в Самарском государственном аэрокосмическом университете, в ООО «Газпром трансгаз Самара» показал, что использование дорогостоящих таких уплотнений дает значительный экономический эффект в эксплуатации. При этом уплотнения нагнетателей природного газа из-за высоких перепадов давлений (8...20 МПа) и из-за отнюдь не авиационной точности изготовления роторных элементов работают зачастую в более напряженных условиях, чем в авиационных двигателях.

Однако, несмотря на наличие фундаментальных исследований в этой области [1-3], до сих пор не созданы методы расчета таких уплотнений для условий применения их в опорах авиационных двигателей. Поэтому целью исследований в настоящей статье является анализ перспективных схем уплотнений и методики их проекторочного расчета.

### 1. Принцип работы перспективных торцовых уплотнений

Торцовое газодинамическое уплотнение (рис. 1) состоит из вращающегося твердосплавного кольца, закрепленного на валу, и аксиально-подвижного углеграфитового кольца, размещенного внутри корпуса, предварительное поджатие которых осуществляется пружинами. На вращающемся кольце имеется напорный участок, на котором выполнены спиральные канавки, а также уплотнительный кольцевой пояс, отделяющий полость высокого давления от полости низкого давления. В качестве вторичных уплотнений обычно используются резиновые уплотнительные кольца. Торцовое газодинамическое уплотнение работает по принципу уравнивания газостатических и газодинамических сил, действующих на аксиально-подвижное и вращающееся кольца (рис. 2).

При стоянке под действием газостатических сил и сил предварительного сжатия пружин уплотнительные кольца прижаты друг к другу. При этом утечки газа через уплотнение не происходит. Однако выбором геометрии уплотнительных колец можно обеспечить величину зазора, при котором уплотнение будет обладать допустимыми утечками и пониженной мощностью трения при запуске двигателя. При вращении вала газ поступает в сужающиеся спиральные канавки и, встречая сопротивление уплотнительного пояса, сжимается, образуя зоны повышенного давления. Давление в торцевой щели повышается, в результате чего аксиально-подвижное кольцо отодвигается от вращающегося кольца, образуя гарантированный зазор 0,002 мм...0,005 мм. Таким образом, во время работы поверхности уплотнительных колец не контактируют друг с другом.

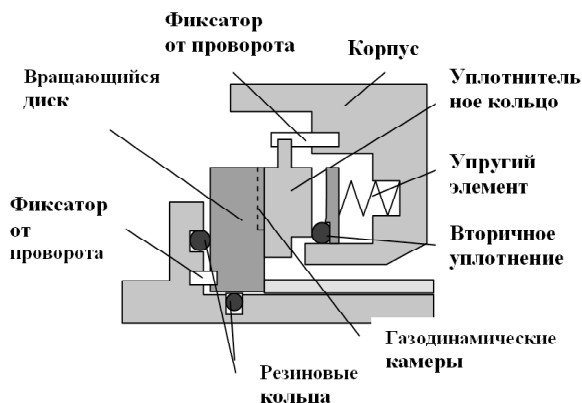


Рис. 1. Схема торцового газодинамического уплотнения

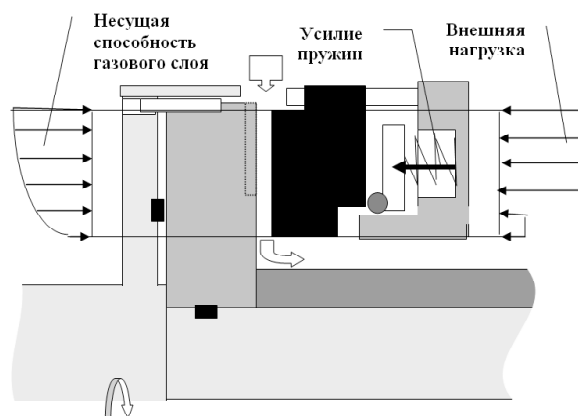


Рис. 2. Действующие осевые силы в торцовом газодинамическом уплотнении

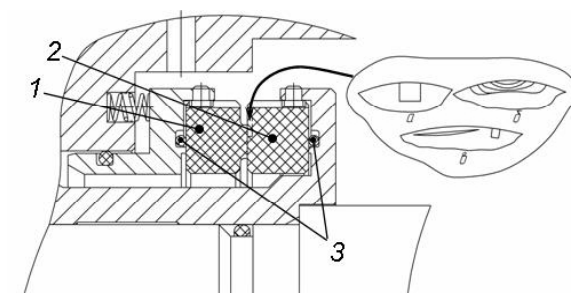


Рис. 3. Схема торцового гидродинамического уплотнения: 1 - невращающееся кольцо; 2 - вращающееся кольцо; 3 - вторичные уплотнения

Торцовое гидродинамическое уплотнение имеет такой же принцип работы. Схема уплотнения приведена на рис. 3. На вращающемся кольце этого уплотнения выполнено восемь микроканавок сложной формы. В настоящее время применяются микроканавки трех видов (рис. 3, а, б, в).

## 2. Расчет уплотнений

Комплекс вопросов, возникающих при проектировании торцовых уплотнений с газовой или жидкостной смазкой, требующих обширного расчетного исследования, представлен на рис. 4. Все эти проблемы взаимосвязаны. Методические основы комплексного их решения изложены в работах [4-5]. Основные технические проблемы использования перспективных торцовых уплотнений в авиационных двигателях связаны с материалами. Особенно важным является выбор материала для вторичного уплотнения. Из-за высокой температуры необходимо применение специальных эластомеров или эластичного графита.

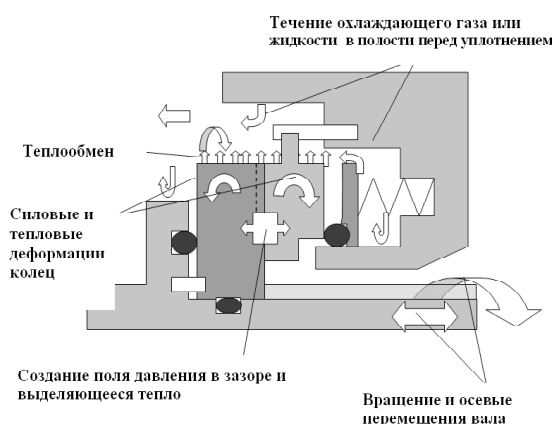


Рис. 4. Основные проблемы, возникающие при проектировании уплотнений

При проектировании уплотнительного узла двигателя основной задачей является определение гидродинамических характеристик слоя смазки в зазоре при наличии микроканавок произвольной формы. Для расчета характеристик торцового газостатического и торцового гидродинамического уплотнений с микроканавками были разработаны математические модели, основанные на применении метода конечных объемов [1,5].

Также разработано программное обеспечение, которое позволяет получать основные характеристики уплотнения с учетом сложной формы зазора. Конусность зазора является следствием воздействия силовых и тепловых нагрузок. Волнистость зазора может возникнуть от неравномерности распределений давления и температуры в окружном направлении. Проведенные исследования показали, что для определения равновесного состояния колец пары трения необходимо использование не менее двух вычислительных циклов: сначала определяются предварительные характеристики уплотнения, далее из решения теплопрочностной задачи находятся уточненные характеристики уплотнения. На рис. 5 изоб-

ражено поле распределения давления в зазоре в секторе с микроканавкой, обеспечивающей создание гидродинамического эффекта при обоих направлениях вращения вала, для торцового газодинамического уплотнения, а на рис. 6 - для торцового гидродинамического уплотнения (рис. 3, б). На рисунках четко видны зоны повышенного давления и разрыва смазки. Чередование зон повышенного и пониженного давлений в окружном направлении приводит к возникновению волнистости уплотнительных поверхностей [5]. За счет оптимизации геометрии колец пары трения 1 и 2 (см. рис. 3) и расположения вторичных уплотнений 3 уравниваются действующие на кольца изгибающие моменты. Благодаря этому обеспечивается плоскостность пары трения, т.е. отсутствует, например, конусность зазора. Совместная теплопрочностная задача решается последовательно. Сначала находится распределение температуры, после чего, используя решение тепловой задачи, рассчитываются деформации колец пары трения.

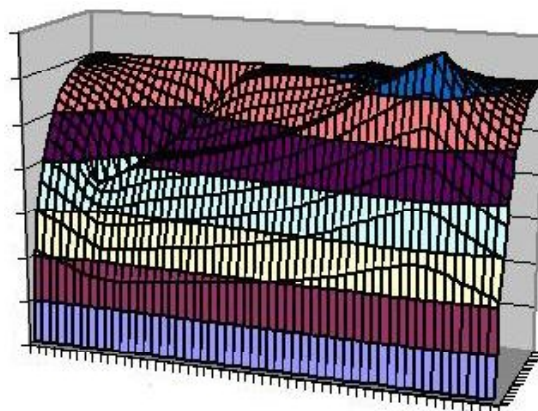


Рис. 5. Поле распределения давления в зазоре торцового газодинамического уплотнения

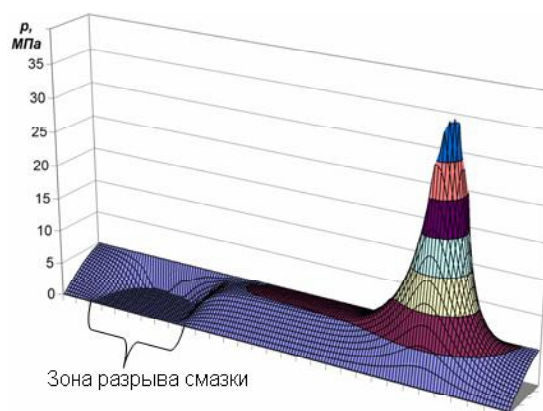


Рис. 6. Поле распределения давления в зазоре торцового гидродинамического уплотнения

### Заключение

Торцовые уплотнения с газовой и жидкостной смазкой являются перспективными для опор ГТД. Разработанная теория позволяет проектировать и доводить уплотнения с микроканавками расчетным или расчетно-экспериментальным методом.

Благодаря этому резко сокращаются затраты времени и материальных средств на отработку уплотнений и, соответственно, изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления правительства РФ №218 от 09.04.2010.

### Литература

1. Lebeck A.O. Principles and Design of Mechanical Face Seals [Text]/ A.O. Lebeck. – New York, 1991. – 764 p.

2. Уплотнения и уплотнительная техника [Текст]: справ. /под общей ред. Голубева А.И. и Кондакова Л.А. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

3. Фалалеев С.В. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: Основы теории и проектирования [Текст] / С.В. Фалалеев, Д.Е. Чегодаев. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 276 с.

4. Белоусов А.И. Проблемы использования торцовых газодинамических уплотнений в авиационных двигателях [Текст] / А.И. Белоусов, С.В. Фалалеев, А.С. Виноградов, П.В. Бондарчук. // Авиационная техника: Известия высших учебных заведений. – Казань, 2007. – №4. – С.31-33.

5. Демура А.С. Методика расчета торцового уплотнения с микроканавками [Текст] /А.С. Демура, С.В. Фалалеев //Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. – №3., – С. 834-838.

Поступила в редакцию 31.05.2012

### **С.В. Фалалеев. Проблеми розробки газодинамічних і гідродинамічних ущільнень для опор авіаційних двигунів**

*Конструювання, виготовлення та експлуатація ущільнень і ущільнювальних систем вимагає великих знань. До ущільнень авіаційних двигунів пред'являються високі вимоги. Газодинамічні і гідродинамічні ущільнення мають широкі перспективи застосування в авіаційних двигунах. Основні проблеми: матеріали, деформації кілець, необхідність створення математичних моделей сполучених процесів. У статті описаний принцип роботи і викладений підхід до проектування торцевих ущільнень з газової та рідинної змазкою. Наведено характерні картини розподілу тиску в зазорі обох типів ущільнень.*

**Ключові слова:** торцеве газодинамічне ущільнення, торцеве гідродинамічне ущільнення, авіаційний двигун, витіки.

### **S.V. Falaleev. The problems development of the gas and fluiddynamic seals for aircraft engine**

*Design, manufacture and operation of the seals and sealing systems require extensive knowledge. For sealing of aircraft engines to meet high demands. Gas-dynamic and hydrodynamic seals are broad prospects for application in aircraft engines. Key issues: materials, the deformation of rings, the need to create mathematical models of coupled processes. This article describes the principle of work and the approach to the design of mechanical seals with gas and liquid lubricant. Shows the characteristic pattern of pressure distribution in the gap of both types of seals.*

**Keywords:** mechanical gas dynamic seal, mechanical hydrodynamic seal, aircraft engine, leakages.