

ДЕМУРА Антон Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК РАСЧЁТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТОРЦОВЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.07.05 – Тепловые,
электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный
аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва»
(национальный исследовательский университет)
на кафедре конструкции и проектирования
двигателей летательных аппаратов

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

С.В. Фалалеев

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор

В.Н. Матвеев

кандидат технических наук

И.П. Косицын

Ведущее предприятие: ОАО «Самарское конструктор-
ское бюро машиностроения»

Защита состоится “25” июня 2010 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертацион-
ного совета Д212.215.02 в Самарском государственном аэрокосмическом универ-
ситете имени академика С.П. Королёва по адресу: 443086, г. Самара, Московское
шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государст-
венного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва

Автореферат разослан “24” мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

А.Н. Головин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для создания авиационных двигателей (АД) нового поколения с улучшенными показателями надежности и экономичности необходимо решение научно-технических проблем, связанных с разработкой, в том числе и высокоэффективных уплотнений газоздушных и масляных полостей, работоспособных при высоких скоростях вращения вала и повышенном давлении рабочей среды. При этом целесообразно использование современной методологии разработки конкурентоспособных двигателей, направленной на сокращение суммарных затрат и сроков создания авиадвигателей путем широкого применения методов математического и компьютерного моделирования, интеграции систем трёхмерного моделирования и компьютерного проектирования.

Эксплуатационные параметры АД определяются допустимыми в их системах величинами рабочих температур, давлений и скоростей, пределы которых в основном диктуются состоянием уплотнительной техники. Среди проблем, возникающих при создании большеобъемных двигателей, проблема уплотнений занимает одно из ведущих мест. Конструирование и применение уплотнений в АД требует учёта многих факторов, которые обычно не являются критическими для других областей техники.

В настоящее время торцовые уплотнения являются основным классом уплотнительных устройств. Постоянно повышающиеся требования к надёжности, герметичности и массе уплотнений вызывают интерес к малорасходным торцовым гидродинамическим уплотнениям (МТГДУ). Под малорасходным уплотнением будем понимать такое уплотнение, для которого выполняется условие $3,5 \cdot 10^{-12} < \dot{m} / \Delta p D < 1,4 \cdot 10^{-10}$ кг/с·Па·м, где \dot{m} – утечки через уплотнение, Δp – перепад давления, D – диаметр вала. В МТГДУ гарантированная плёнка смазки создается за счёт совместного использования гидростатического и гидродинамического принципов, а также эффекта обратного нагнетания утечек жидкости назад в уплотняемое пространство посредством особого структурирования уплотнительных поверхностей. Это позволяет уплотнению работать с малой утечкой без изнашиваемости пары трения в широком диапазоне параметров на различных режимах работы. Однако в настоящее время применение уплотнений такого типа сдерживается недостаточной их изученностью и отсутствием достоверных методик расчёта. Возникает необходимость в системном подходе к исследованию и проектированию МТГДУ с учётом условий эксплуатации, а также в разработке перспективных конструкций уплотнений АД. Поэтому проблема создания научно-технического задела для разработки высокоэффективных, малорасходных, работающих без износа торцовых уплотнений для герметизации опор авиационных двигателей и их агрегатов является весьма актуальной. Результаты исследований могут быть использованы для отработки существующих изделий на повышенный ресурс.

Цель исследования. Повышение достоверности расчётов, снижение сроков и затрат на проектирование торцовых гидродинамических уплотнений с пониженными утечками для опор роторов авиационных двигателей и их агрегатов за счет создания методики проектирования уплотнений с учетом сложных форм зазора и микроканалов, сил инерции, разрыва слоя смазки, шероховатости уплотнительных поверхностей и многорежимности двигателей.

Задачи исследования.

1. Разработка математической модели и методики расчёта МТГДУ с микроканавками произвольной формы с учётом сил инерции, наличия зон разрыва смазки и сложной формы зазора.

2. Исследование закономерностей влияния конструктивных и эксплуатационных факторов, характерных для условий применения уплотнений в составе авиационного двигателя, на характеристики МТГДУ.

3. Создание комплексной методики проектирования МТГДУ с микроканавками для опор роторов АД с учётом концепции совместного гидродинамического и теплового расчётов, а также многорежимности двигателя.

4. Проверка работоспособности созданной методики проектирования и использование её для разработки перспективных конструкций МТГДУ для АД.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы математического анализа, гидродинамики, теплопередачи, программирование с использованием языков высокого уровня, комплексная система автоматизированного проектирования «САПР», программный комплекс «ANSYS» на основе метода конечных элементов.

Научная новизна.

1. Теоретическое обоснование возникновения гидродинамической несущей способности в контакте торцового уплотнения от использования микроканавок и от волнистости уплотнительной поверхности, образуемой за счёт неравномерного теплообмена в кольцах пары трения при наличии зон разрыва смазки, что обеспечивает бесконтактную работу уплотнения и надёжность АД.

2. Обобщенная математическая модель и методика расчёта МТГДУ с микроканавками произвольной формы, позволяющая учесть геометрические параметры уплотнений и характерные условия их работы в составе АД (перепад давления, температуру рабочей среды, высокие частоты вращения ротора).

3. Методика расчета тепловых деформаций колец пары трения с учётом неравномерности температурного поля в них из-за наличия разрыва смазки.

4. Методика проектирования многорежимных МТГДУ с микроканавками, реализованная в комплексе САД/САЕ-пакетов, с возможностью включения в систему автоматизированного проектирования (САПР) двигателя.

5. Результаты математического моделирования процессов и исследования характеристик МТГДУ в составе опор АД и его агрегатов. Разработанные на их основе рекомендации по созданию высокоэффективных МТГДУ для новых двигателей, а также по повышению эффективности двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации, путем замены используемых уплотнений на МТГДУ.

Практическая ценность. Полученные теоретические положения развивают фундаментальные подходы к проектированию уплотнений и исследованию происходящих в них процессов. Результаты диссертации являются научным достижением в области проектирования и внедрения МТГДУ опор роторов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), открывающим широкие возможности по повышению их работоспособности и долговечности. В работе представлены разработанные научно обоснованные рекомендации по выбору параметров МТГДУ с учётом особенностей их эксплуатации в составе авиационного ГТД, в том числе и многорежимности. Предложенная методика комплексного проектирования созда-

ет научный задел по созданию высокоэффективных МТГДУ, что открывает реальную перспективу широкого их внедрения в разрабатываемые авиационные двигатели и агрегаты подачи топлива ракетных двигателей, а также повышения эффективности двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации, путем замены используемых уплотнений на МТГДУ.

Разработанные методики расчёта, модели и алгоритмы использованы для моделирования работы торцовых уплотнений с микроканавками различной формы, созданных опытным путем фирмами HECKER (Германия) и FLOWSERVE (США), университетом г. Штутгарт (Германия), и при проектировании и экспериментальной отработке уплотнения подвода смазки к опоре ротора внутри вала (совместная разработка СГАУ и университета г. Штутгарт), рекомендованы для использования в ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова», а также внедрены в учебном процессе СГАУ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной физической и математической постановкой задач, строгостью использованного математического аппарата, сопоставлением полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других исследователей.

Апробация работы. Результаты диссертации доложены, обсуждены и одобрены на 7 научных конференциях (НК) и симпозиумах: Всероссийской молодёжной научной конференции «Всероссийская молодёжная научная конференция, посвящённая 75-летию УГАТУ» (Уфа, 2007 г.); Региональном научно-техническом семинаре «Актуальные проблемы трибологии» (Самара, 2008 г.); Международной НК «XII Международная научная конференция, посвящённая памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва» (Красноярск, 2008 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии – НМТ-2008» (Москва, 2008 г.); Форуме MSC «Комплексные технологии виртуальной разработки изделий (VPD). Опыт применения на предприятиях СНГ и Балтии 2007» (Москва, 2007 г.); Всероссийской молодёжной научной конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2008 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2009 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ. Из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 9 публикаций в материалах научно-технических конференций.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 107 наименований. Общий объём диссертации составляет 148 страниц, 93 рисунка и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы и выбранного направления исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведено исследование современных проблем проектирования уплотнений опор роторов АД. Анализ тенденций развития уплотнительных устройств позволил выделить МТГДУ в качестве эффективных и перспективных герметизирующих устройств. Развитием фундаментальных основ теории торцовых уплотнений, которые могут быть применены для МТГДУ, занимается ряд

научных школ и организаций в России: А.И. Голубев, В.А. Мельник (г. Москва); В.А. Максимов (г.Казань); В.П. Наугольников, А.В. Иванов (г. Воронеж); Ю.Н. Пономарев (г. Санкт-Петербург); А.И. Белоусов, С.В. Фалалеев, В.А. Зрелов, А.С. Виноградов, Д.С. Лёжин (г. Самара); и другие, - а также за рубежом: В.А. Марцинковский (Украина); Э.П. Кревсун (Белоруссия); E. Mayer и H.K. Mueller (Германия); A.O. Lebeck, H.S. Cheng и L.P. Ludwig, I. Green, D.F. Wilcock (США); I. Etsion (Израиль); Brunetiere N. (Франция); H. Lubbinge (Голландия); B.S. Nau (Великобритания); Hirabayasi, Takisima, Mori, Kawahara (Япония) и др.

Анализ опубликованных теоретических работ и результатов исследований МТГДУ позволил выделить основные научные направления развития таких уплотнений. При создании уплотнений для опор высокоскоростных роторов АД важное значение принимает учёт влияния сил инерции, тепловых и силовых деформаций, двухфазного режима течения и многорежимности работы двигателя. На сегодняшний день не существует методики расчёта МТГДУ, связывающей во едино влияние этих факторов. Анализ современных конструкций показал, что МТГДУ достигли высоких функциональных возможностей. Это связано с применением современных материалов, разработкой сложных конструктивных решений (выполнение комплекса микроструктур сложной формы (рис. 1), работающих при обоих направлениях вращения вала, придание волнистости уплотнительным поверхностям) и совершенствованием технологии изготовления колец. Однако данные успехи достигнуты за счёт многочисленных испытаний и длительного процесса доводки изделия. Таким образом, в настоящее время применение МТГДУ в мире, особенно в России, сдерживается из-за недостаточной изученности этого типа уплотнений и отсутствия достоверных методик их проектирования. Вышеперечисленные факторы были взяты за основу для постановки целей и задач исследований в диссертации.

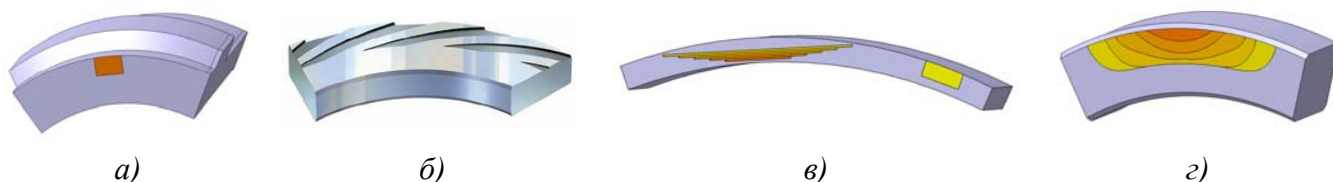


Рис. 1. Виды микроканалов:
 а) прямоугольная; б) спиральная; в) структуры обратного нагнетания;
 г) HST (Hydrodynamic Surface Tension)

Вторая глава посвящена исследованию характеристик слоя жидкостной смазки с учётом характерных условий работы данного типа уплотнений в составе АД. При расчёте характеристик уплотнения основная трудность заключается в нахождении распределения давления в щели уплотнения. На сегодняшний день имеются аналитические зависимости для нахождения распределения давления в кольцевой щели без реверсивных микроканалов на основе уравнения, полученного из уравнений Навье–Стокса с учётом принятых допущений и осреднением инерционных членов по толщине слоя по методу Слёзкина–Тарга. Однако из-за сложности дифференциальных уравнений эти зависимости получены лишь для частных случаев.

Создание высокоэффективных МТГДУ связано с выполнением сложных микроструктур на уплотнительных кольцах, особенности действия которых необходимо учитывать при расчёте характеристик уплотнения. Условия работы

МТГДУ в опорах высокоскоростных роторов АД диктуют необходимость также учитывать сложную форму зазора (рис. 2), силы инерции и разрыв слоя смазки в зазоре. Здесь r_1 и r_2 – внутренний и наружный радиус уплотнительного пояса, p_1 и p_2 давление внутри и снаружи.

Для решения данных задач использовался метод конечных объёмов. Суть метода заключается в следующем. Весь объём торцового кольцевого зазора разбивается на элементарные соприкасающиеся объёмы. Пример такого выделенного объёма изображён кубиком на рис. 3. Внутри каждого контрольного объёма находится одна точка «привязки» сеточного решения.

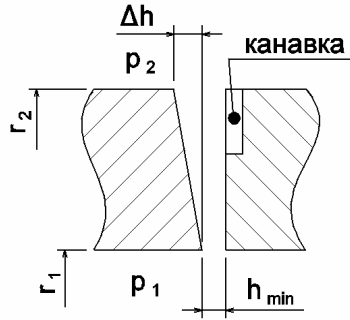


Рис. 2. Упрощенная схема зазора сложной формы

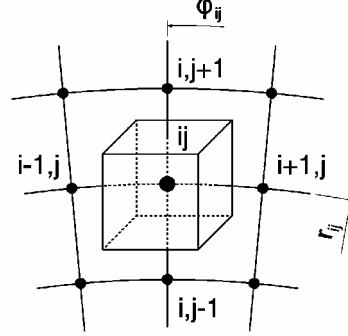


Рис. 3. Пример разбиения участков сектора

Из условия равенства расходов через контрольный объём в радиальном и окружном направлениях находим значения давления в каждой точке.

С учётом сил инерции уравнение для определения давления p в точке ij будет иметь вид:

$$p_{ij} = (B_{ij}p_{i-1,j} + C_{ij}p_{i+1,j} + D_{ij}p_{i,j-1} + E_{ij}p_{i,j+1} + F_{ij} + G_{ij}) / A_{ij}, \quad (1)$$

где коэффициенты

$$A_{ij} = \frac{\Delta r}{24\mu\Delta\varphi} \left[2\left(\frac{h^3}{r}\right)_{ij} + \left(\frac{h^3}{r}\right)_{i-1,j} + \left(\frac{h^3}{r}\right)_{i+1,j} \right] + \frac{\Delta\varphi}{24\mu\Delta r} \left[2(h^3r)_{ij} + (h^3r)_{i,j-1} + (h^3r)_{i,j+1} \right]$$

$$B_{ij} = \frac{\Delta r}{24\mu\Delta\varphi} \left[\left(\frac{h^3}{r}\right)_{ij} + \left(\frac{h^3}{r}\right)_{i-1,j} \right]; \quad C_{ij} = \frac{\Delta r}{24\mu\Delta\varphi} \left[\left(\frac{h^3}{r}\right)_{ij} + \left(\frac{h^3}{r}\right)_{i+1,j} \right];$$

$$D_{ij} = \frac{\Delta\varphi}{24\mu\Delta r} \left[(h^3r)_{ij} + (h^3r)_{i,j-1} \right]; \quad E_{ij} = \frac{\Delta\varphi}{24\mu\Delta r} \left[(h^3r)_{ij} + (h^3r)_{i,j+1} \right]$$

$$F_{ij} = r_{ij} \frac{\omega\Delta r}{4} (h_{i-1,j} - h_{i+1,j}); \quad G_{ij} = \frac{\rho\omega^2\Delta\varphi}{80\mu} \left[(h^3r^2)_{i,j+1} - (h^3r^2)_{i,j-1} \right].$$

Здесь h – текущая величина зазора (в месте расположения микроканавок параметр равен сумме величины зазора и глубины канавки); r, φ – координаты точки в полярной системе координат; μ – динамическая вязкость жидкости, ρ – плотность жидкости, ω – частота вращения ротора. Коэффициент G_{ij} учитывает силы инерции.

Искомые значения давления находим методом итераций до достижения требуемой точности. Когда распределение давления в зазоре $p=p(r, \varphi)$ определено, рассчитывают усилие W (несущую способность слоя), раскрывающее уплотнительное соединение, изгибающий момент $M_{изг}$, жёсткость слоя смазки C , потери мощности на трение в торцовом зазоре N :

$$W = \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} p r dr d\varphi; M_{usz} = \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} p \cdot r^2 dr d\varphi; C = -dW / dh; N = \mu \omega^2 \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{r^3}{h(r, \varphi)} d\varphi dr.$$

Расход жидкости через щель уплотнения в радиальном направлении:

$$Q = \frac{1}{12\mu} \int_0^{2\pi} \left[r h^3(r, \varphi) \frac{dp}{dr} \Big|_{r=r_1} \pm \frac{3\rho \omega^2 r^2 h^3(r, \varphi)}{10} \right] d\varphi.$$

Здесь второй член в скобках учитывает влияние сил инерции. Знак – или + определяется направлением течения жидкости (к оси вращения или от неё).

Для МТГДУ также имеют место потери мощности на нагнетание смазки в зазор для создания гидродинамической несущей способности слоя. Потерянную мощность можно представить как сумму произведений элементарных расходов через зону канавки в окружном направлении на создаваемые ими напоры

$$N_{нагн} = \sum \left(-\frac{h_i^3 \Delta r}{12\mu r_i} \frac{\Delta p_i}{\Delta \varphi} + \frac{r_i \Delta r \omega h_i}{2} \right) p_i.$$

Минимальный зазор в щели уплотнения h находится из условия равновесия «закрывающих» и «раскрывающих» уплотнительный стык сил $W = F$, где F – нагружающая сила (учитывает воздействие давления и силу прижатия пружин, а также силу трения во вторичном уплотнении). Под величиной зазора в работе понимается эквивалентный зазор, учитывающий параметры шероховатости поверхностей. При расчёте утечек для учёта шероховатости уплотнительных поверхностей использовался метод Патира и Ченга.

Таким образом, получена математическая модель для расчёта МТГДУ с микроканавками. На основе этой математической модели разработано программное обеспечение, которое позволяет рассчитывать основные характеристики уплотнения с учётом перераспределения давления в области разрыва слоя смазки, влияния сил инерции и сложной формы зазора. В зоне разрыва смазки давление принимается равным давлению насыщенного пара. Параметры жидкостной пленки (вязкость, плотность) задаем при осредненной температуре контактных поверхностей колец уплотнения, полученной из решения тепловой задачи в пакете ANSYS. Это допущение обосновано, так как температура уплотнительных поверхностей практически выравнивается за счёт применения современных материалов колец с высокими коэффициентами теплопроводности. Анализ результатов расчёта тепловой задачи показал, что разность температур на входе и выходе из уплотнительной щели обычно составляет менее 10 К. А так как слой смазки тонкий (~1 мкм), то он прогревается и имеет температуру контактных поверхностей колец уплотнения. Зависимостью вязкости и плотности от давления в расчётах пренебрегаем. Но, используя вышеописанный подход для нахождения распределения давления, эту зависимость можно учесть, если не усреднять плотность и динамическую вязкость жидкости в формуле (1), а ввести аналитические зависимости или задавать конкретные значения параметров массивом данных для каждой точки ij .

В результате выполнения расчётов разработанной программой получаем характеристики МТГДУ (минимальную величину рабочего зазора, жёсткость слоя смазки, изгибающий момент, утечки жидкости, мощность трения) и поле распределения давления (рис. 4).

Для проверки достоверности созданной методики произведен сравнительный расчёт распределения давления в уплотнении без микроканалов с зазором с плоскопараллельными поверхностями, а также обладающем конусностью и волнистостью, по известным аналитическим формулам и с помощью разработанной расчётной программы. Максимальная разность результатов в первом случае составила менее 1%, а во втором – менее 5%. Так как программа основывается на применении методов конечных объёмов и итераций, то точность полученного результата будет определяться параметрами расчётной модели (количество итераций и разбиений по радиусу и окружности). Наличие микроканалов сложной формы существенно повышает требования к качеству модели. Были разработаны рекомендации по выбору количества разбиений и итераций для достижения необходимой точности: минимальное количество разбиений по радиусу достигает 20, по окружности (для сектора с микроканалкой) около 150 и требуется не менее 6000 итераций расчёта.

Используя полученное программное обеспечение, проведено исследование влияния различных факторов на характеристики слоя жидкостной смазки. В качестве основных факторов, определяющих работу МТГДУ для опор высокоскоростных роторов АД, были выбраны: перепад давления, частота вращения вала (рис. 5), конусность зазора, глубина (рис. 6) и количество микроканалов, динамическая вязкость жидкости (рис. 7).

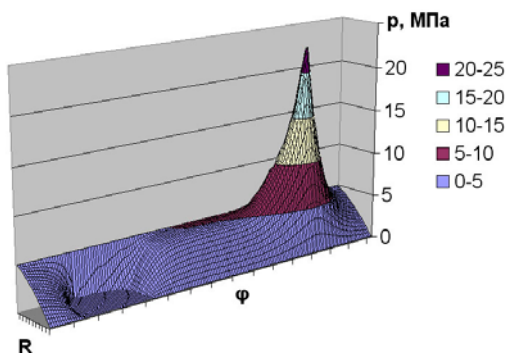


Рис. 4. Пример поля распределения давления

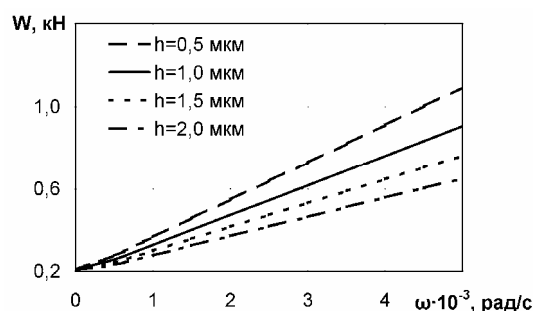


Рис. 5. Зависимость несущей способности слоя смазки от частоты вращения вала

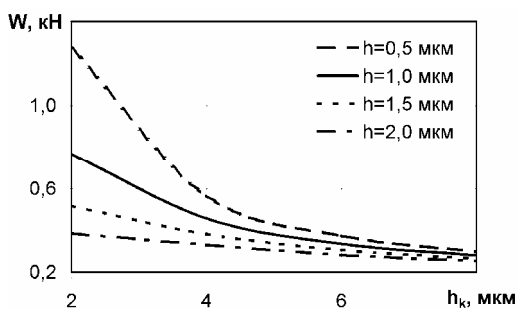


Рис. 6. Зависимость несущей способности слоя смазки от глубины микроканалов (h_k)

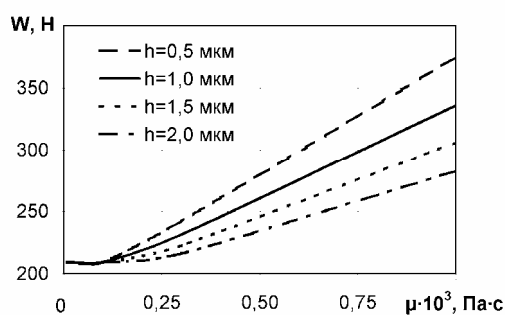


Рис. 7. Зависимость несущей способности слоя смазки от вязкости жидкости

По результатам исследования разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров уплотнения для обеспечения гарантированной жидкостной пленки в контакте торцового уплотнения при приемлемой величине утечек. Так, при перепадах давления до 3 МПа оптимальными являются относительно большие величины зазора порядка 2 мкм, что обеспечивает приемлемую величину утечек при невысоких значениях мощности трения.

При высоких перепадах давления (свыше 3 МПа) следует обеспечивать небольшую величину зазора около 1 мкм для снижения утечек. Полученные зависимости влияния частоты вращения вала показывают, что для уплотнений высокоскоростных роторов наиболее рациональными являются значения рабочего зазора 1...1,5 мкм. Это обеспечивает минимальные утечки, удовлетворительную мощность трения и повышенные значения несущей способности слоя. Данный диапазон значений рабочего зазора также наиболее оптимален при динамической вязкости более 10^{-4} Па·с. Также можно отметить, что высокие значения конусности зазора приводят к значительному снижению несущей способности и увеличению утечек. Наиболее приемлемой является положительная конусность (конфузорность щели). Из полученных зависимостей влияния параметров микроканалов на характеристики уплотнения видно, что минимальная глубина микроканалов (менее 4 мкм) обеспечивает максимальную несущую способность слоя, однако, и величина утечек возрастает, количество же каналов необходимо выбирать из оптимального соотношения величины утечек, жёсткости слоя смазки и несущей способности слоя.

Проведено сравнение микроканалов различной формы. Анализ показал, что при прочих равных условиях структуры обратного нагнетания (рис. 1, в) обеспечивают максимальную несущую способность, но и величина утечек значительна. По соотношению Q/W наибольшей эффективностью обладают прямоугольные каналки (рис. 1, а), однако из-за низкой несущей способности их применение ограничено. Для многорежимных уплотнений, работающих в широком диапазоне изменений эксплуатационных параметров, наиболее оптимальны структуры HST (рис. 1, г).

Также проанализировано влияние сил инерции на характеристики МТГДУ. Выявлено, что при перепадах давления менее 4,5 МПа и частотах вращения вала более 500 рад/с учёт сил инерции является необходимым условием, так как погрешность расчёта превышает 10% и может достигать 80%.

В третьей главе рассматриваются тепловое состояние и деформации колец пары трения МТГДУ при использовании их в качестве уплотнительного узла опоры авиационного двигателя. В результате исследования имеющихся публикаций были выделены основные методы теплового расчёта уплотнений. Их анализ показал, что вследствие сложности протекающих процессов на данный момент не существует унифицированной методики теплового расчёта для МТГДУ. Большинство методик имеют ограниченную специфическую применимость и дают приблизительные решения, которые необходимо уточнять экспериментальными данными.

Чтобы рассмотреть совместно гидродинамическое, тепловое и напряженно-деформированное состояние колец пары трения, в работе решена сопряжённая задача с применением конечно-элементного комплекса ANSYS. Решение получено в двух постановках – плоской и объёмной. Это связано с тем, что создание и использование плоской модели требует гораздо меньше ресурсов и во многих случаях её применение оправдано. Однако она не даёт полной картины деформаций колец при учёте зон разрыва смазки. Решение сопряжённой задачи в трёхмерной постановке позволило учесть неравномерность температур рабочих поверхностей в окружном направлении (рис. 8), связанной с существенным различием мощно-

сти трения в заполненной жидкостью части щели уплотнения и в зонах разрыва смазки.

На основе полученных решений сопряженной задачи выявлено, что в результате тепловых деформаций помимо конусности зазора при учёте зоны разрыва смазки возникает также его волнистость. На рис. 9 и 10 представлены изменения величины деформаций от мощности трения и материалов колец по длине средней линии сектора вращающегося кольца. Из рисунков видно, что с увеличением мощности трения с 500 Вт до 1 кВт, амплитуда волнистости увеличивается примерно в два раза, при использовании колец из сочетания материалов «карбид кремния – карбид кремния» (К–К) величина волнистости меньше по сравнению с сочетанием «сталь – графит» (С–Г) в 1,7 раза.

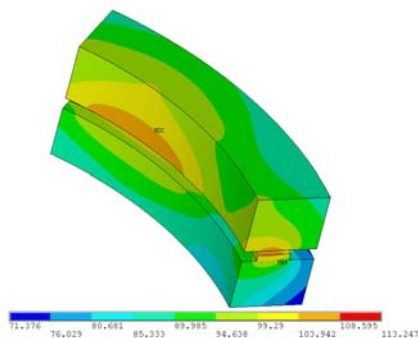


Рис. 8. Пример распределения температуры в кольцах пары трения

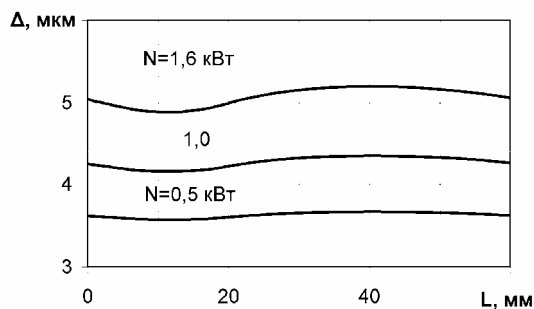


Рис. 9. Зависимость перемещений от мощности трения

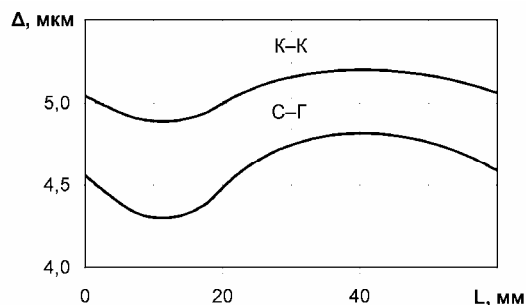


Рис. 10. Зависимость перемещений от комбинации материалов уплотнительных колец

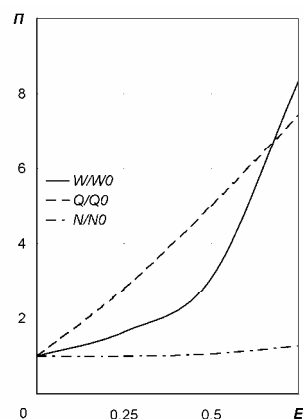


Рис. 11. Влияние амплитуды волнистости на характеристики уплотнения

Для того чтобы оценить влияние волнистости зазора, возникающей от тепловых деформаций кольца уплотнения, а также технологической волнистости уплотнительной поверхности, было проведено расчётное исследование зависимости характеристик уплотнения от амплитуды волнистости с помощью разработанного программного комплекса. На рис. 11 приведена зависимость безразмерного параметра Π , равного отношению значений параметров при текущей величине волнистости и при её отсутствии, от относительной величины E , равной отношению величины амплитуды волнистости к средней величине зазора. Видно, что наличие волнистости приводит к незначительному увеличению мощности трения N и существенному росту несущей способности слоя W и утечек Q .

Кроме возникновения тепловых деформаций при работе МТГДУ также имеют место и силовые деформации колец пары трения, которые необходимо рас-

смазывать совместно. В работе приведен анализ причин возникновения силовых деформаций, исследованы области применения двух методов их расчета (аналитического и с помощью пакета ANSYS). Разработаны рекомендации по минимизации силовых деформаций за счёт выбора оптимальной геометрии поперечного сечения уплотнительного кольца.

Четвёртая глава работы посвящена практическому применению результатов исследования. Разработана методика комплексного проектирования МТГДУ с микроканавками с учётом концепции совместного гидродинамического и теплового расчётов и многорежимности авиационного двигателя. Её особенности:

- комплексный подход к расчёту МТГДУ;
- определение расчётным путем зависимостей для утечек и несущей способности слоя смазки в щели;
- учёт реальной формы зазора в уплотнении;
- учёт происходящих в щели уплотнения процессов (влияние сил инерции и разрыва слоя смазки);
- выбор параметров уплотнений, исходя из обеспечения надёжности АД на всех режимах его работы.

Данная методика основана на использовании современных программных продуктов (схема взаимодействия применяемых программных продуктов представлена на рис. 12), что позволит внедрить её в САПР предприятия.



Рис. 12. Взаимодействие программных модулей

Достоверность разработанной методики проверена анализом существующих конструкций МТГДУ, перспективных для применения в качестве уплотнений авиационных ГТД и их агрегатов.

При анализе модифицированного уплотнения HN406 фирмы «HECKER» с применением разработанного программного комплекса подтверждена работоспособность МТГДУ при выполнении на уплотнительной поверхности колец из карбида кремния (SiC) шести микроканавок прямоугольной формы шириной 3 мм, длиной 2 мм и глубиной 6 мкм (рис. 1, а). Расчётным путем получено, что при конусности зазора 1,5 мкм и амплитуде волнистости 0,05 мкм уплотнение будет работать с зазором около 1 мкм. Это хорошо согласуется с данными, полученными при пересчёте величины момента трения, замеренного в процессе экспериментальных исследований. Сравнение расчётных и экспериментальных данных для уплотнения фирмы «FLOWSERVE» с рабочими кольцами из SiC, на которых выполнены микроканавки HST (рис. 1, г), показал удовлетворительное их совпадение. Исследование работы МТГДУ (материал колец – SiC) со структурами обратного нагнетания (рис. 1, в), разработанного в университете г. Штутгарт, показало, что уплотнение работает с минимальным зазором величиной 0,3 мкм при величине технологической конусности 1 мкм. Это согласуется с экспериментом, уплотнение работало без износа с величиной утечек жидкости 4,1 мл/ч. Во всех исследованных случаях разность теоретических и экспериментальных значений составила от 5 до 20 %.

С использованием созданной методики в рамках партнерства с университетом г. Штутгарт было спроектировано уплотнение для подвода масла к опоре ротора внутри вала (рис. 13). Теоретический анализ и экспериментальные исследования уплотнения показали, что при выполнении спиральных канавок (рис. 1, б) на торцевой поверхности чугунного поршневого кольца имеется незначительное увеличение утечек, но мощность трения снижается более чем в 2 раза (рис. 14).



Рис. 13. Схема уплотнения подвода масла внутри вала

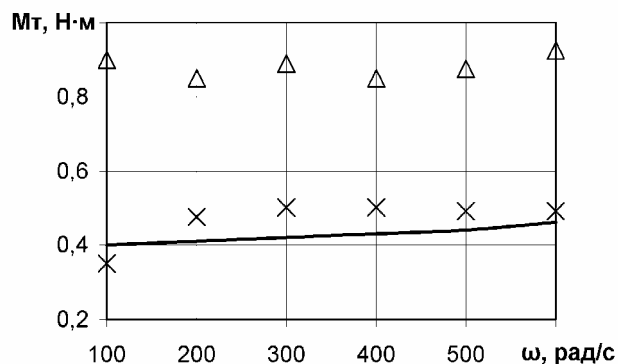


Рис. 14. Зависимость момента трения (M_t) от частоты вращения вала:

Δ – результаты измерений для контактного уплотнения; \times – результаты измерений для уплотнения с микроканавками; — – результаты расчета

Также были спроектированы два новых многорежимных уплотнения для опоры ТРДДФ и агрегата подачи криогенного топлива ТРДД и его конвертированной модификации. Основываясь на результатах расчёта, были подобраны оптимальные параметры уплотнений, обеспечивающие надежность работы двигателя за счёт создания гарантированной жидкостной пленки в контакте торцевого уплотнения на всех режимах его работы, что исключает изнашивание уплотнительных поверхностей.

Так, для агрегата подачи топлива вместо имеющейся системы уплотнений была разработана конструкция МТГДУ (рис. 15), состоящая из вращающегося кольца 1 из карбида кремния, на поверхности которого выполнено шесть микроканалов НСТ, неподвижного графитового кольца 3, вторичных уплотнений из материала МР в фторопластовой оболочке 6, набора пружин 5, фиксирующих от проворота элементов 2 и 4 для подвижного и неподвижного колец. Работа уплотнения моделировалась на режимах эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ) агрегата. Исследования показали, что спроектированное МТГДУ работает в бесконтактном режиме (величина зазора до 1,6 мкм) и обладает на порядок более низкими утечками (рис. 16) по сравнению с исходной системой уплотнений.

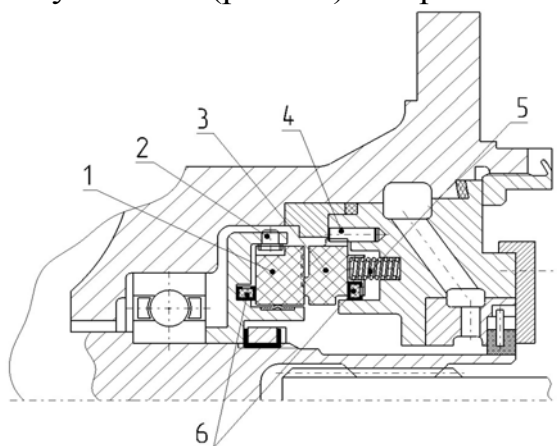


Рис. 15. Спроектированная конструкция МТГДУ

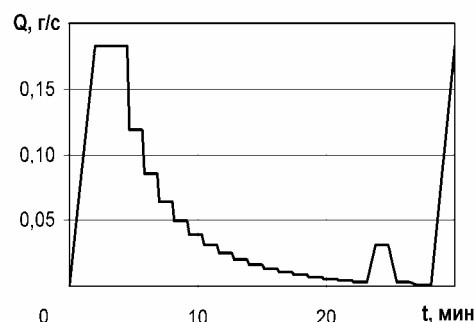


Рис. 16. Изменение расхода жидкости по времени ЭЦИ

Для опоры ротора компрессора ТРДДФ было разработано РТКУ с жидкостной смазкой (материалы пары трения: сталь и графит). Для подвода масла в зону контакта пары трения на торце вращающегося кольца имеется кольцевая канавка с питающими отверстиями. Бесконтактная работа уплотнения обеспечивается выполнением четырёх микроканалов прямоугольной формы на уплотнительной поверхности этого кольца. Исследования показали, что данное уплотнение в течение полетного цикла обеспечивает работу с гарантированным зазором около 2 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена задача повышения достоверности расчётов, снижения сроков и затрат на проектирование торцовых гидродинамических уплотнений с пониженными утечками для опор роторов авиационных двигателей и их агрегатов, имеющая важное хозяйственное значение, за счёт создания методики их комплексного проектирования с учётом сложной формы микроканалов, гидродинамических и тепловых процессов, а также многорежимности авиационного двигателя. Разработанные рекомендации по проектированию МТГДУ создают предпосылки для совершенствования уплотнений авиационных двигателей и обеспечения требуемых показателей их надёжности. Подводя итоги проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

1. В результате проведённых исследований разработана математическая модель и методика расчёта МТГДУ с микроканавками с использованием метода конечных объёмов, которая была протестирована путём сравнения расчетных результатов с существующими аналитическими решениями и экспериментальными

данными. На её основе создано программное обеспечение, которое позволяет рассчитывать основные характеристики уплотнения с учётом сложной формы зазора и микроканалов, сил инерции, разрыва слоя смазки, шероховатости уплотнительных поверхностей на всех режимах работы авиационного двигателя. Учет данных факторов, определяющих работу уплотнения в составе АД, позволил повысить достоверность расчётов.

2. Проведены исследования влияния параметров расчётной модели и сил инерции на результаты расчёта, а также различных факторов (перепад давления, частота вращения вала, конусность зазора, глубина и количество микроканалов, динамическая вязкость жидкости) на характеристики МТГДУ. Полученные зависимости позволили получить рациональные параметры уплотнения для работы в различных условиях в составе опор авиационных двигателей и их агрегатов. Так, рекомендуемая величина рабочего зазора в широком диапазоне параметров составляет 1...1,5 мкм. При перепаде давления менее 4,5 МПа и частоте вращения вала более 500 рад/с учёт сил инерции является необходимым условием.

3. Решена сопряженная задача в двух- и трёхмерной постановке с применением программы ANSYS на основе метода конечных элементов и совместным рассмотрением гидродинамических характеристик, теплового и напряженно-деформированного состояния колец пары трения. Из решения трёхмерной задачи получено наличие конусности и волнистости уплотнительных поверхностей. Проанализированы зависимости амплитуды волнистости от мощности трения и материала колец. Анализ влияния амплитуды волнистости на характеристики уплотнения показал, что даже незначительная волнистость приводит к существенному росту несущей способности слоя и утечек. Проанализированы силовые деформации колец пары трения, что позволило разработать рекомендации по их минимизации и расчёту.

4. На основе проведённых исследований разработана методика проектирования МТГДУ с микроканавками с учётом концепции совместного гидродинамического и теплового расчётов и многорежимности АД. Её применение позволяет проектировать уплотнение, учитывая основные факторы и особенности работы МТГДУ в составе АД. Методика основана на комплексном использовании современных программных продуктов CATIA и ANSYS, а также разработанной программы по расчёту гидродинамического течения в щели уплотнения, и может быть внедрена в САПР предприятия. За счёт этого достигается снижение сроков на проектирование уплотнения.

5. Результаты работы использованы для анализа созданных опытным путем торцовых гидродинамических уплотнений с микроканавками, разработанных фирмами HECKER, FLOWSERVE, университетом г. Штутгарт, при создании и экспериментальной отработке уплотнения подвода смазки к опоре ротора внутри вала (совместная разработка СГАУ и университета г. Штутгарт), при проектировании перспективных уплотнений для авиационного ГТД и агрегата подачи топлива, а также в учебном процессе СГАУ. В результате их применения получено, что созданная методика проектирования МТГДУ обладает достаточной точностью и высокой эффективностью. Она позволит существенно снизить сроки и затраты на разработку уплотнений АД, а также повысить его качество.

Основные научные результаты диссертации изложены в следующих работах:

Статьи в рекомендованных ВАК РФ журналах:

1. Белоусов, А. И. Теория торцовых уплотнений с микроканавками для высокоскоростных роторов ДЛА [Текст] / А. И. Белоусов, С. В. Фалалеев, А. С. Демура // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань, 2009. – № 3. – С. 50–53.

2. Демура, А. С. Методика расчёта торцового уплотнения с микроканавками [Текст] / А. С. Демура, С. В. Фалалеев // Известия СНЦ РАН. – Самара, 2008. – Т.10, №3. – С. 834-838.

Публикации:

3. Демура, А. С. Математическая модель течения жидкости в торцовом зазоре произвольной формы [Текст] / А. С. Демура // Мавлютовские чтения: материалы всерос. молодёж. науч. конф., посвящ. 75-летию УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2007. – Т. 1. – С. 11–12.

4. Демура, А. С. Обеспечение надёжности торцового уплотнения [Текст] / А. С. Демура // Актуальные проблемы трибологии: труды Регионал. науч.–техн. семинара. – Самара: СамГТУ, июнь 2008. – С. 87–88.

5. Демура, А. С. Учет волнистости при проектировании торцовых бесконтактных уплотнений [Текст] / А. С. Демура // Мавлютовские чтения: материалы Всерос. молодёж. науч. конф. – Уфа: УГАТУ, 2008. – Т. 1. – С. 22.

6. Демура, А. С. Использование информационных технологий при проектировании узлов авиационного двигателя [Текст] / А. С. Демура, И. А. Жданов, А. С. Мятлев, А. П. Ремпель // Мавлютовские чтения: труды Всерос. молодёж. науч. конф.– Уфа: УГАТУ, 2008. – Т. 1. – С. 25.

7. Демура, А. С. Проектирование перспективных уплотнений силовых установок летательных аппаратов [Текст] / А. С. Демура // Решетневские чтения: материалы XII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно–космических систем ак. М.Ф. Решетнева. – Красноярск: САУ, 10–12 нояб. 2008. – С. 63–64.

8. Фалалеев, С. В. Комплексное проектирование узлов авиационного двигателя [Текст] / С. В. Фалалеев, А. С. Демура, И. А. Жданов, А. С. Мятлев, А. П. Ремпель // Решетневские чтения: материалы XII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно–космических систем ак. М.Ф. Решетнева. – Красноярск: САУ, 10–12 нояб. 2008. – С. 80–81.

9. Фалалеев, С. В. Проектирование элементов авиационного двигателя с интегрированным использованием САД/САЕ – пакетов [Текст] / С. В. Фалалеев, А. С. Демура, И. А. Жданов, А. С. Мятлев // Новые материалы и технологии – НМТ–2008: материалы Всерос. науч.–техн. конф. М.: МАТИ, 11–12 нояб. 2008. – Т. 3. – С. 188–189.

10. Фалалеев, С. В. Моделирование элементов силовых установок [Электронный ресурс] / С. В. Фалалеев, Д. С. Лежин, А. С. Демура [и др.] // MSC. Software: комплексные технологии виртуальной разработки изделий (VPD). Опыт применения на предприятиях СНГ и Балтии: материалы форума MSC 2007. – М.: MSC. Software, 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – 6 с.

11. Демура, А. С. Метод повышения надёжности уплотнений опор роторов авиационных двигателей [Текст] / А. С. Демура // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.–техн. конф. Самара: СГАУ, 24–26 июня 2009. – Ч. 2. – С. 58–59.