

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ГАЗОВОЙ СМАЗКОЙ В СОВРЕМЕННЫХ ГТД

Фалалеев С. В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Проблемы герметизации в опорах ГТД

При создании разнообразных образцов техники с подвижными элементами возникает необходимость решения проблемы уплотнений. В природе не существует аналогов скользящему уплотнению. Полная герметичность часто остается невыполнимым желанием не только из-за основополагающих физических проблем, но также и из-за требуемой экономичности решения. Из-за разнообразия условий эксплуатации и требований к герметичности создаются многочисленные уплотнительные системы в различных отраслях машиностроения, в основном на основе торцовых уплотнений. В ряде случаев уплотнительные системы насосов являются более дорогими, чем сами насосы. Нередко затраты на ремонт в сотни или тысячи раз превышают стоимость разрушенных уплотнительных элементов. Мировая статистика катастроф показывает, какую беду может принести рискованно сконструированная уплотнительная система. С ростом давлений, температур и скоростей скольжения места выхода валов из корпуса оказываются часто для конструкторов камнем преткновения.

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.

Основные проблемы, возникающие при создании новой авиационной и ракетно-космической техники, связаны, в первую очередь, с требованиями повышения экономичности и увеличения срока эксплуатации

новой техники. Эксплуатационные параметры двигателей летательных аппаратов и их агрегатов зависят от допустимых в них уровней давлений, температур и скоростей, пределы которых часто определяются возможностями используемых уплотнений. В опорах авиационных двигателей уплотнения работают при температурах до 1000 К, давлениях до 1 МПа, окружной скорости до 250 м/с. В перспективе ожидается дальнейшее увеличение степени сжатия воздуха в компрессоре, температуры газа перед турбиной, степени двухконтурности, частоты вращения роторов, что повысит нагрузки на узлы уплотнений. Следует учесть, что наряду с ростом параметров двигателей увеличивается их ресурс. Требуемые ресурсы: ГТД – 30 тыс. ч, конвертируемых двигателей – до 100 тыс.ч. Внедрение новой техники и конвертирование двигателей сдерживается отсутствием доведенных высокоресурсных уплотнительных узлов, которые были бы работоспособны и в более жестких условиях эксплуатации.

Авиационный ГТД имеет около 50 различных уплотнительных устройств. Их работоспособность существенно влияет на характеристики двигателя и всего летательного аппарата. Отказы уплотнений стоят на третьем месте среди 28 причин аварий ГТД. В случае уплотнений опор роторов утечки горячего воздуха в масляную полость вызывают возникновение масляного тумана и коксование масла. Ухудшающееся вследствие этого охлаждение подшипников может значительно сократить ресурс двигателя. Конструирование и применение уплотнений в ДЛА 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 трение, 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.

Традиционные типы уплотнений опор роторов ГТД

В настоящее время в качестве уплотнений опор роторов двигателей применяются лабиринтные, торцовые и радиально-торцовые уплотнения. Лабиринтные уплотнения имеют неограниченный ресурс, однако пропускают большие утечки. Поэтому нужно снижать давление и температуру воздуха, протекающего в масляную полость, что достигается

созданием промежуточных полостей. В конечном итоге это приводит к усложнению конструкции уплотнения, увеличению его веса и снижению к.п.д. двигателя. Торцовые контактные уплотнения (ТКУ) имеют значительно меньшие утечки, так как осуществляют герметизацию за счет непосредственного контакта уплотняющих поверхностей вращающейся детали ротора и невращающейся втулки. Чаще всего одна из деталей, образующих уплотнительную щель, изготовлена из графита, а другая - из металла или керамики. Для компенсации износа уплотнительных поверхностей и осевой подвижности вала одно из колец делается подвижным в осевом направлении и поджимается одной или несколькими пружинами к другому кольцу. В качестве вторичного уплотнения применяются резиновые кольца, фторопластовые манжеты или сильфоны. Используются также устройства, препятствующие провороту одного кольца относительно корпуса и другого - относительно вала. Из-за трения в зоне контакта, приводящего к возникновению высокой температуры, ТКУ имеют ограничение по скорости скольжения примерно в 100 м/с. Создание новых пар трения отстает от постоянного роста эксплуатационных параметров. В настоящее время пределом использования торцовых контактных уплотнений в ДЛА считается значение параметра $p_v = 50$ МПа м/с, а их ресурс вследствие изнашиваемости пары трения достигает лишь нескольких сотен или тысяч часов. Радиально-торцовые контактные уплотнения (РТКУ) с наружной цилиндрической и торцовой рабочими поверхностями и разрезным графитовым кольцом, установленным на валу, имеют меньшие утечки, чем лабиринтные уплотнения. Однако эти утечки значительно выше, чем через ТКУ. К тому же радиально-торцовые контактные уплотнения имеют ограничения по скорости скольжения и перепаду давления. РТКУ получили широкое распространение благодаря конструктивной простоте и малым габаритам. Радиально-торцовое уплотнение (РТУ) с внутренней цилиндрической и торцовой рабочими поверхностями, с бандажированным графитовым кольцом, установленным в статоре, при скорости скольжения 150 м/с, температуре воздуха 920 К и перепаде давления 1 МПа имеет утечки в 7 раз меньшие, чем лабиринтное уплотнение.

В последнее время в ряде конструкций малоразмерных ГТД стали использоваться графитовые сегментные уплотнения, ранее широко применявшиеся в ТНА ЖРД. Зафиксированное от проворота плавающее графитовое кольцо, разрезанное на 3...5 сегментов, браслетной пружиной прижимается к поверхности вала, обеспечивая надежную герметизацию и компенсацию величины изнашивания.

Применение модного в настоящее время щеточного уплотнения в качестве уплотнения масляной полости опоры ротора двигателя, на наш

взгляд, ограничено. Оторвавшиеся проволочки могут попасть в подшипник и вывести его из строя. Попадание масла на щетку вызовет его коксование, что блокирует подвижность щетки.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования вышеперечисленных уплотнений позволили выявить области их использования и показали невозможность решения проблемы герметичности опор роторов в целом только с помощью этих уплотнений. То есть, их возможности не перекрывают всего спектра потребностей.

Торцовые уплотнения с газовой смазкой в ГТД

Постоянно повышающиеся требования к надежности, герметичности и весу уплотнений вызывают интерес к торцовым уплотнениям с газовой или жидкостной смазкой, или торцовым бесконтактным уплотнениям (ТБКУ). 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 ТКУ. В особенности при очень высоких скоростях вращения роторов таким уплотнениям не имеется альтернативы.

Первые попытки применения торцовых уплотнений с газовой смазкой в авиационных двигателях относятся к 60-м годам. Однако возникли значительные трудности при их практическом воплощении. Многочисленные попытки исследователей расширить область применения таких уплотнений по частотам вращения роторов, давлению и температуре рабочих сред лишь способствовали утверждению мнения о том, что существующие конструкции уплотнений и методы их расчета несовершенны.

Гарантированная газовая пленка в зазоре торцового уплотнения создавалась с помощью газостатических и газодинамических камер. Для уменьшения температурных и силовых деформаций конструкция создаваемых уплотнений существенно усложнялась. С целью снижения негативного влияния деформаций уплотнительных поверхностей на работоспособность уплотнений рабочие зазоры находились в диапазоне 20...30 мкм, что приводило к повышенным утечкам. Все это практически сводило на нет преимущества таких уплотнений.

С развитием магнитных подшипников для компрессорных установок вновь возрос интерес к торцовым уплотнениям с газовой смазкой. Успешная их комбинация позволяет эксплуатацию компрессоров без использования масла. В уплотнительной технике между тем был накоплен значительный опыт в работе с новыми материалами и техноло-

гиями. Это создало предпосылки для успешного применения торцовых уплотнений с газовой смазкой и в газотурбинных двигателях.

Характерными особенностями торцовых уплотнений для турбомашин ДЛА является экстремальность нагрузок (высокие значения перепадов давлений, температур и скоростей скольжения; динамические нагрузки) и многорежимность (циклическое изменение этих нагрузок во время работы двигателя). Это приводит к возникновению деформаций уплотнительных поверхностей, величины которых изменяются при переходе от одного режима работы двигателя к другому. Поэтому одной из основных проблем является создание конструкций уплотнений, которые, с одной стороны, имели бы небольшие деформации уплотнительных колец за счет применения перспективных материалов и различных конструктивных мероприятий и, с другой стороны, были бы работоспособны при наличии значительных искажений уплотнительных поверхностей на всех режимах работы двигателя. Уплотнения также должны сохранять высокую работоспособность при вибрации ротора. Все эти проблемы возможно решить с помощью торцовых уплотнений с газовой смазкой.

Сравнительный анализ утечек через различные уплотнения (диаметр вала 140 мм, частота вращения ротора 500 рад/с, перепад давления воздуха 0,6 МПа) приведен в таблице.

Таблица - Утечки через уплотнения роторов ГТД

Тип уплотнения	Характерные величины	Утечки, г/с
1. Система лабиринтов	15 ступеней лабиринтов	40
2. Система плавающих уплотнений с графитовыми кольцами	4 кольца шириной 10 мм, радиальный зазор 0,05 мм	8
3. Торцовое газодинамическое уплотнение	величина зазора 5 мкм	1,3

Зарубежный опыт создания торцовых уплотнений с газовой смазкой

Широкое появление торцовых уплотнений с газовой смазкой на мировом рынке связано с фирмой John Crane. Удачно подобрав материалы и применив оригинальные конструкторские решения и высокие технологии, эта фирма в 80-х годах стала законодателем моды. Руководство фирмы приняло правильное решение, создав мощный расчетный центр, позволивший разработать гамму серийных конструкций для широкого применения в газовой и химической отраслях. Следует отметить высокую стоимость таких уплотнений – 50...100 тыс.\$.

вок для создания газодинамического эффекта, фирма John Crane открыла новое направление – реверсивные канавки, которые одинаково работают при обоих направлениях вращения ротора. Разработанные и запатентованные позднее другими фирмами конструкции уплотнений явились по сути своей “усовершенствованными” вариантами уплотнений John Crane, причем чаще всего с более худшими характеристиками. Все это привело к тому, что в настоящее время солидность уплотнительной фирмы определяют по наличию в ассортименте выпускаемой продукции торцовых уплотнений с газовой смазкой.

Так, сходные конструкции уплотнений разработали позднее фирмы Burgmann (клиновидные канавки), Sealol (спиральные канавки), Pazifik (камеры Рэлея). Проектные разработки усиленно проводила и фирма Flexibox. Однако в последние годы фирма John Crane скупилла всех своих выше названных конкурентов, кроме фирмы Burgmann (Германия). Фирма Burgmann смогла выдержать конкурентную борьбу благодаря традиционному немецкому качеству выпускаемой продукции и тем, что сумела провести революцию в технике герметизации, которую в России, к сожалению, не заметили. Конструкторское бюро этой фирмы проработало возможность использования торцовых уплотнений с газовой смазкой в уплотнительных комплексах для практически всех отраслей промышленности, в том числе, например, и для тихоходных мешалок различного назначения. И многие из этих уплотнений уже успешно используются, в том числе и в аэрокосмической промышленности. И если около 10 лет назад фирма Burgmann продавала в год единицы торцовых уплотнений с газовой смазкой, то в настоящее время этот вид продукции составляет существенную часть от общей производимой продукции фирмы. Одна из последних гениальных разработок фирмы – торцовое уплотнение для 3-литрового автомобильного двигателя. Две характеристики этого уплотнения: мощность трения 4 Вт и стоимость всего 7 DM, являются темой жарких дискуссий в фирмах, производящих автомобильные двигатели и, особенно, производящих традиционные контактные уплотнения для этих двигателей. Низкая стоимость обусловлена тем, что вращающееся кольцо вместе с микроканавками изготавливается литьем в штампованный корпус и используется стекловидный материал, поэтому в дальнейшей обработке кольца нет необходимости. То есть, после литья рабочая поверхность имеет приемлемые неплоскостность и шероховатость. Чрезвычайно низкая мощность трения позволяет использовать дешевые материалы с удовлетворительными теплофизическими свойствами.

Отечественный опыт создания торцовых уплотнений с газовой смазкой

В СССР в 70...80-х годах проектные разработки проводились в КуАИ, ВНИИГидромаше, ЛМИ и ряде других организаций. Однако успешная разработка торцовых уплотнений со спиральными канавками с последующим внедрением в нагнетатели природного газа началась при-

мерно 10 лет назад на Сумском производственном объединении им. Фрунзе. Тщательно изучив экземпляр торцового уплотнения, кушленного у фирмы John Crane для монтажа на Тольяттинском ЛПУ, инженеры “скопировали” уплотнительный узел для ГПА-Ц16. Однако из-за различия характеристик материалов (не удалось найти полного аналога графита) потребовалась многолетняя доводка. В настоящее время это Украинское предприятие выпускает широкий спектр уплотнений, стоимость которых в 2 и более раз ниже, чем у аналогичных зарубежных образцов. Наиболее творческая часть инженеров ушла с этого предприятия, создав специализированную фирму “Крейс”, которая в настоящее время является наиболее крупным специализированным производителем торцовых уплотнений с газовой смазкой в СНГ.

Успешный опыт сумчан явился катализатором для создания отечественных уплотнений. В 1991-1992 годах начались работы в ЦКТИ (г. Ленинград) и ВНИИКриогенмаше (г. Балашиха). В ЦКТИ разрабатывалось уплотнение для нагнетателя природного газа 235, но работа из-за прекращения финансирования не была завершена. Однако было создано уплотнение для химической промышленности, которое успешно выдержало опытную эксплуатацию. Широкого распространения Ленинградский опыт не получил, так как не было создано базы для серийного производства. В ВНИИКриогенмаше был создан стендовый образец уплотнения для турботетандера, который показал очень хорошие характеристики. Однако из-за ряда причин работы были приостановлены. Примерно в 1994 году в связи с разработкой российских нагнетателей природного газа начались работы по созданию уплотнений на Казанском компрессорном объединении. Однако из-за ошибочного понимания процессов, происходящих в торцовых газодинамических уплотнениях, работы зашли в тупиковое направление. В частности, исследовались уплотнительные кольца из стали с различными покрытиями вместо цельных колец из дорогостоящего карбида вольфрама. Для снижения деформации важны характеристики материала самого кольца, а не его покрытия.

В 1992 году разработкой торцовых газодинамических уплотнений для компрессорных установок начали заниматься ученые СГАУ. Были созданы оригинальные образцы уплотнений, которые не попадают под действие зарубежных патентов. Одно из уплотнений было успешно испытано в нагнетателе природного газа и на обкаточном стенде для уплотнений авиационного ГТД. Из-за плохого финансирования процесс доводки таких уплотнений затянулся во времени. Однако в настоящее время на базе ООО “САМАРАТРАНСГАЗ” создана экспериментальная база и первый в России участок для серийного производства торцовых уплотнений с газовой смазкой.

Основные технические проблемы связаны с материалами. Особенно важным является выбор материала для вторичного уплотнения. Из-за высокой температуры необходимо применение специальных эластомеров или эластичного графита.

Изготовление торцовых газодинамических уплотнений требует высоких технологий. Для изготовления микроканалов в настоящее время наиболее перспективным является применение лазера. Также очень важно обеспечить требуемые неплоскостность и шероховатость уплотнительных поверхностей. Распространенная на наших предприятиях ручная притирка уплотнительных колец не позволяет гарантированно обеспечить требуемое качество поверхностей. Если в торцовых контактных уплотнениях это приемлемо из-за применения обкатки, то в торцовых газодинамических уплотнениях контакт поверхностей недопустим, а плохо притертое кольцо является часто причиной возникающих деформаций в эксплуатации. Поэтому необходимо применение высокоточных притирочных машин, которые у нас в стране не производятся.

Для обеспечения надежности уплотнения необходимо обеспечить требуемую чистоту поступающего в уплотнение воздуха (5 мкм). Поэтому необходимо конструирование компактных динамических фильтрующих устройств.

Также необходимо отметить, что при создании высокоэффективных уплотнений современных ГТД необходим новый подход, требующий большого объема расчетных и экспериментальных исследований.

Одной из основных проблем является консервативность мышления у специалистов аэрокосмической промышленности. Опыт работы с предприятиями АО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, КБ Энергомаш, КБХА показал, что использование высокоэффективных, но исключительно сложных торцовых уплотнений с газовой смазкой возможно лишь в тех случаях, когда применением традиционных уплотнений нельзя решить возникшую проблему герметизации. Путь повышения характеристик двигателей за счет замены традиционных уплотнений на более эффективные уплотнения, которые показали высокую надежность и экономичность в газовой промышленности (ресурс уплотнений составляет 8...10 лет), является для специалистов этой отрасли абсолютно неприемлем. Типичные отговорки, что уплотнение является второстепенным элементом в двигателе и что успешный опыт эксплуатации в газовой промышленности ни о чем не говорит из-за ненапряженных условий эксплуатации, являются глубоко ошибочными. 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. Однако специалисты газовой промышленности умеют считать деньги. Использование дорогостоящих уплотнений с газовой смазкой, требующих для изготовления применения высоких технологий, дает колоссальный экономический эффект в эксплуатации.