

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УПЛОТНЕНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТА ОПОРЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2009 А. С. Виноградов, А. П. Ремпель

Самарский государственный аэрокосмический университет

Выполнен анализ работы уплотнения как элемента опоры двигателя. Рассмотрены особенности процессов передачи тепла от воздуха, окружающего корпус опоры различных типов двигателей, через стенки в масло. Оценена величина теплового потока и уровня температуры стенок, омываемых маслом для конкретного примера. Даны рекомендации по выбору рациональной защиты стенок масляной полости средней опоры.

Двигатель, торцовое контактное уплотнение, опора, теплообмен, тепловая защита, тепловой поток, масляная система, масляная полость, буферная полость, суфлирование

При проектировании опоры инженеру-конструктору приходится решать комплекс научно-технических задач, связанных с обеспечением ее работоспособности. Одним из наиболее уязвимых элементов опоры авиационного двигателя является уплотнение. В случае применения торцового контактного уплотнения требования к конструкции опоры резко ужесточаются: необходимо обеспечить требуемые величины радиальных и торцовых биений, смещений и перекосов осей, осевых и радиальных смещений и т.д. Поэтому нужно точно прогнозировать влияние деформаций деталей опоры на работу уплотнения.

Традиционно рассматриваются вопросы, связанные с проектированием самой пары трения: расчет утечек через уплотнительный зазор, деформации колец пары трения, тепловыделение в зоне контакта, динамические процессы. Однако такой подход не может быть признан исчерпывающим. Необходимо рассматривать уплотнение как элемент опоры авиационного двигателя и решать возникающие при этом задачи.

Большое влияние работа уплотнения оказывает на систему внутреннего воздухообеспечения двигателя [1]. Применительно к авиационным двигателям можно рассматривать следующие основные внутренние воздушные потоки: наддув и суфлирование опор, охлаждение горячих элементов, разгрузка упорных подшипников, регулирование радиальных и осевых зазоров, обогрев элементов входа в двигатель. Функционирование отдельных элементов системы внут-

реннего воздухообеспечения является взаимосвязанным и сильно зависит от режима и условий работы двигателя. Непосредственно с уплотнением связано функционирование наддува и суфлирования масляных полостей. Масляные полости двигателя отделены от воздушных и газовых полостей уплотнениями. Для обеспечения нормальной работы этих уплотнений масляные полости сообщают с атмосферой, т. е. суфлируют. Суфлирование необходимо для предотвращения повышения давления в масляных полостях, которое возможно из-за проникающих через уплотнения воздуха и газов, испарения масла, а также подогрева воздуха разбрызгиваемым маслом. При отсутствии суфлирования может произойти выброс масла в газовоздушный тракт двигателя.

Суфлирование выполняют различными способами. В одних типах двигателей масляные полости соединяют между собой, а затем одну из них через суфлер сообщают с атмосферой; в других – каждая из полостей имеет самостоятельную систему суфлирования. Пропуская воздух и газы в атмосферу, суфлер задерживает капельки масла, уменьшая тем самым его расход. На современных ГТД большое распространение получили центробежные суфлеры.

Герметичность уплотнения во многом определяет, например, величину прокачки масла через опору двигателя. Поскольку точный расчет теплоотдачи в смазочное масло связан с большими трудностями, то часто пользуются статистическими данными. Для ТРД теплоотдача составляет 3...6 кДж/с на

10 кН стендовой тяги; для ТВД–15...25 кДж/с на 1000 кВт эквивалентной стендовой мощности. В ТРДД теплоотдача в меньшей степени зависит от тяги, так как часть тепла передается воздуху второго контура. Для средних и крупных двигателей теплоотдача составляет 35...55 кДж/с.

Приближенно можно считать в среднем для ТРДД на каждые 10 кН тяги $W = (0,3...1,0) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$, для ТВД на каждые 1000кВт эквивалентной мощности $W = (2...5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. При этом прокачка смазочного масла через отдельные подшипники ротора составляет: через роликовые – 1...3 л/мин, через шариковые подшипники фиксирующих опор – 4...10 л/мин и через роликовые подшипники турбин – 5 ... 10 л/мин.

Прокачка масла через приводы агрегатов в ТРД составляет 20...50 % всей прокачки масла через двигатель, а через редуктор в турбовинтовых двигателях 40...60 %.

Другим важным аспектом проектирования торцевого уплотнения является изучение его работы как элемента опоры [2]. Здесь необходимо выполнять моделирование опоры, расчет коэффициентов теплоотдачи, определение напряженно-деформированного состояния деталей опоры и расчетные исследования, посвященные изучению возможных путей снижения деформаций. Созданная конечно-элементная модель позволяет выполнять расчет для различных значений температуры масла, различных материалов деталей и других условий.

В настоящее время в связи с постоянным усложнением конструкции двигателей летательных аппаратов и их удорожанием требуются надежные методы расчета, позволяющие уже на этапе проектирования выявить и устранить недостатки. Это приведет к тому, что этап доводки будет занимать меньшее время и требовать меньшие средства, что в современной конкурентной борьбе имеет критическое значение.

Опора находится под воздействием множества факторов. При проектировании опоры необходимо знать не только тепловые потоки в нее, но и распределение температур и напряженно-деформированное состояние в любой момент работы двигателя. Это позволяют сделать современные конечно-

элементные комплексы, в том числе и ANSYS.

Основное, на что обращается внимание при расчете – это перемещения деталей торцевого уплотнения. Современные мощные авиационные ГТД являются многовальными (двухвальными, трехвальными). В них возникает проблема уплотнений межвального стыка валов, вращающихся с различными угловыми скоростями. Для этих целей также применяют торцевые уплотнения как ТКУ, так и РТКУ. Применение торцевых уплотнений в ответственных узлах авиадвигателей объясняется их следующими положительными качествами: они работают с практически нулевыми утечками; в период нормальной работы не требуется их обслуживания; потеря мощности на трение в торцевых уплотнениях сравнительно невысока; правильно подобранное торцевое уплотнение отличается большой износостойкостью; торцевые уплотнения удовлетворительно работают при сравнительно большом биении вала машины и мало чувствительны к смещению вала относительно расточки корпуса.

К недостаткам торцевых уплотнений относятся: сложность их изготовления, сравнительно высокая стоимость, трудности в подборе материалов для пар трения.

К числу недостатков межвальных ТКУ относится прежде всего наличие вторичного уплотнения в виде резиновых колец. Большие центробежные силы, действующие на резиновые кольца, сильно прижимают их к втулке ТКУ, что может привести к заеданию втулки и выходу из строя вторичного уплотнения. Этому способствует также большой коэффициент трения резины по стали и возможность набухания резинового кольца, стоящего со стороны масляной полости опоры и работающего в среде масляных паров при высокой температуре (до 150°C). Кроме того, большие осевые перемещения опорного кольца при температурном расширении валов значительно изменяют удельные давления в уплотнительном стыке за счет дополнительного поджатая стояночных пружин. Перечисленных недостатков лишены межвальные РТКУ.

Для расчета деформаций в опоре необходимо сначала провести тепловой расчет распределения температур в элементах опо-

ры. Для проведения этого расчета рассчитываются коэффициенты теплоотдачи в элементах опоры в начальный и конечный моменты времени. Также в расчете учитывается то, что после сброса газа наблюдается повышение температуры масла на период около 2 минут со 155°C до 170°C, что связано с резким уменьшением количества топлива, которое используется для охлаждения масла. Затем температура падает до 80°C. Как правило элементы опоры изготавливаются из разных материалов, имеющих различные физические свойства.

Исследование характеристик уплотнения является одновременно важной и в то же время практически не исследованной задачей. Совершенно очевидно, что деформации стенок опоры влияют на работу уплотнения. Конкретный пример будет рассмотрен ниже. Справедливо также и то, что уплотнение влияет не только на опору, но и на системы наддува, суфлирования двигателя. Так как их характеристики должны выбираться в том числе, исходя из обеспечения работоспособности уплотнения. В то же время во всех опубликованных работах уплотнительный узел рассматривается как модуль без связи с узлом опоры, для которой он предназначен. Для исследования важности этой проблемы была проанализирована работа ТКУ в составе средней опоры двигателя НК-144.

На этом двигателе, устанавливаемом на самолете Ту-144, во время эксплуатации возникал дефект – повышение давления в опоре до 1 атм., при допустимом 0.5 атм. Экспериментальный график изменения давления показан на рис. 1. Повышение давления возникало в момент сброса газа при переходе с сверхзвукового полета на дозвуковой.

При поиске причины дефекта производились различные испытания. Для их верификации было рассчитано тепловое состояние опоры при условии перехода с режима сверхзвукового полета на дозвуковой (нестационарный расчет), и для подтверждения правильности расчетной модели результаты расчета сравнивались с экспериментальными данными.

При выполнении расчетных исследований были приняты определенные ограничения и допущения:

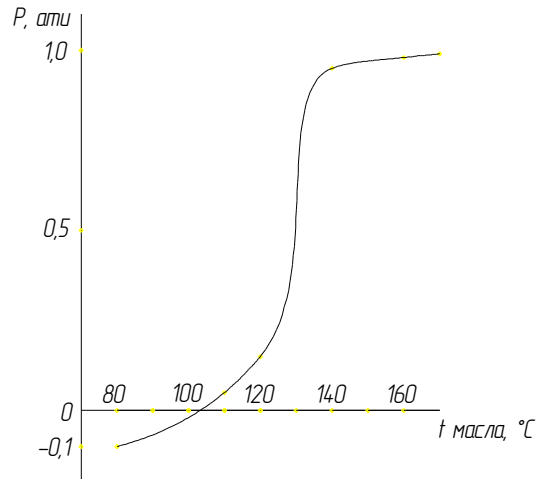


Рис. 1. Изменение давления в средней опоре двигателя НК-144

- опора представляет собой неразъемную цельнометаллическую конструкцию;
- температура среды в опоре одинакова во всех точках;
- тепловые потоки через трактовую поверхность и боковые стенки не зависят друг от друга;
- закрепление модели выполнялось за внешний обод первого контура;
- температура стенки трактовой поверхности принималась равной температуре омывающего воздуха.

Основная задача состояла в расчете коэффициентов теплоотдачи. Конвективным теплообменом или теплоотдачей называется процесс переноса теплоты между поверхностью твердого тела и жидкой средой. При этом перенос теплоты осуществляется одновременным действием теплопроводности и конвекции. Тепло в опору поступает через стенки опоры, трактовую поверхность и через вал. Теплообмен на боковых стенках протекает путем теплопередачи от воздуха, приведенного во вращение дисками компрессора (слева и справа), к маслу, попадающему на стенки опоры со стороны масляной полости. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке определяется по формуле

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_A}{d_A}$$

Самым сложным было определить коэффициенты Нуссельта. Они были определены по эмпирическим формулам, полученным при испытаниях на ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова». После расчетов коэффициентов была составлена схема поступления

тепла в опору от различных источников с простановкой в процентах количества внешнего тепла, показанная на рис. 2.

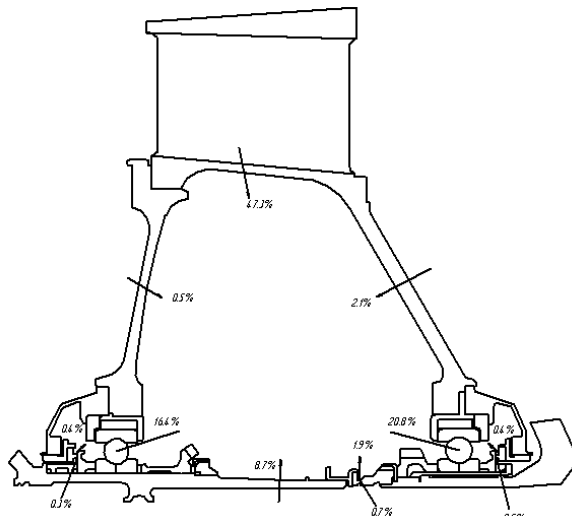


Рис. 2. Тепловые потоки в средней опоре двигателя НК-144

После прочностного расчета производился тепловой расчет для определения распределения температур. В качестве результатов рассматривались перемещения левой и правой частей межвального ТКУ и расстояние между ними, т. к. его состояние влияет на работоспособность опоры и двигателя в целом. Результаты расчета деформаций опоры вместе с узлом уплотнения показаны на рис.3.

Кроме того, был произведен анализ влияния на деформации температуры масла в опоре, влияния материала опоры и времени перехода с режима на режим.

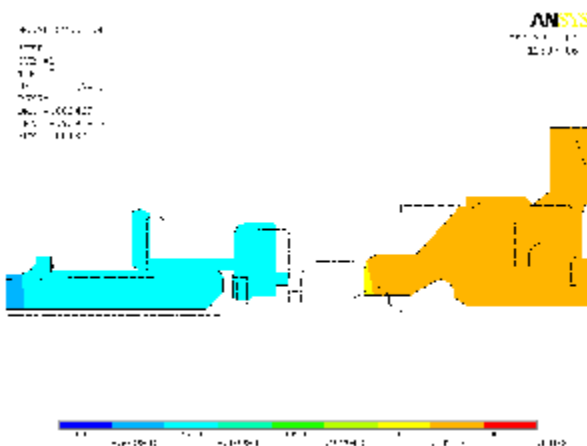


Рис. 3. Деформации деталей опоры в месте межвального уплотнения

Было получено хорошее совпадение результатов расчета и экспериментальных данных. Данные исследований показали, что дефект мог возникать из-за заедания втулки на штифтах вследствие деформаций в процессе работы. Отсюда можно сформулировать конструктивные способы уменьшения деформаций деталей опоры при ее проектировании. Исследование функционирования уплотнения как элемента опоры приводит к необходимости исследовать следующие вопросы: величину прокачки масла через опору, конструктивные способы подвода масла, расчет теплового состояния элементов опоры на всех режимах работы двигателя, выбор и расчет конструкции тепловой защиты опоры. Следует отметить, что подходы к проектированию уплотнения будут отличаться в зависимости от того, является ли рассматриваемое уплотнение элементом опоры компрессора или турбины, а также авиационного двигателя, или наземной энергетической установки.

В статье были проанализированы только некоторые из возможных направлений совершенствования метода проектирования ТГДУ. Сжатый объем статьи не позволяет остановиться на других проблемах более развернуто, что конечно не означает того, что они являются менее важными. С увеличением числа внедрения ТГДУ становится очевидной необходимость создания обобщенного метода проектирования таких уплотнений как элемента не только отдельного узла (опоры) или системы, но двигателя в целом.

Библиографический список

1. Трянов, А.Е. Проектирование систем суфлирования масляных полостей авиационных двигателей: учеб пособие/ А.Е. Трянов, О.А. Гришанов, С.В. Бутылкин. – Самара: Изд-во Самар.гос. Аэрокосм. Ун-та, 2006. - 83 с.
2. Hart, K. Basic architecture and sizing of commercial aircraft gas turbine oil feed systems// ASME-Pap-GT-2008-50450.

References

1. Tryanov, A.Ye. Drain system desing of oil cavities for aircraft engines: textbook // A.Ye.

Tryanov, O.A. Grishanov, S.V. Butylkin. - Samara: Samara State Aerospace University, 2006.- p. 83. (in Russian).

2. Hart K. Basic architecture and sizing of commercial aircraft gas turbine oil feed systems// ASME-Pap-GT-2008-50450.

RESEARCH OF A SEAL WORK AS AN ELEMENT OF THE AIR ENGINE SUPPORT

© 2009. A. S. Vinogradov, A. P. Rempel

Samara State Aerospace University

The analysis of a seal work as an element of a engine support is executed. The features of heat exchange processes from the surrounding support housing air through walls to oil are considered for the various types of engines. For a concrete example the size of a thermal flow and temperature level for the walls washed by oil is valued. The recommendations about the rational protection choice for the walls of an oil cavity are given.

Engine, face contact seal, support, heat exchange, thermal protection, thermal flow, oil system, oil cavity, buffer cavity, draining

Информация об авторах

Виноградов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел.: (846)-267-46-75. E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: торцовые уплотнения, конструкция авиационных двигателей, надежность машин.

Ремпель Александр Петрович, аспирант кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел.: (846)-267-46-75. E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: торцовые уплотнения, конструкция и прочность авиационных двигателей.

Vinogradov Alexandr Sergeevich, candidate of technical science, docent of department «Construction and design of aircraft engines» of Samara State Aerospace University. Phone: (846)-267-46-75. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: face seals, aircraft engine design, reliability of machines.

Rempel Alexandr Petrovich, postgraduate student of department «Construction and design of aircraft engines» of Samara State Aerospace University. Phone: (846) -267-46-75. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: face seals, aircraft engine design and strength.