

КОНСТРУКЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТОРЦОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ ОПОРЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2011 Бондарчук П. В., Фалалеев С. В.

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрены перспективы и актуальность применения торцового газодинамического уплотнения (ТГДУ) в авиационном двигателе. Предложена оригинальная конструкция ТГДУ опоры авиационного двигателя, минимизирующая вероятность попадания масла в пару трения.

Торцовое газодинамическое уплотнение, герметизация масляной полости авиационного двигателя, щелевое уплотнение.

Основные проблемы, возникающие при создании новой авиационной техники, связаны, в первую очередь, с требованиями повышения её экономичности и увеличения срока эксплуатации. Требуемый ресурс к началу эксплуатации проектируемых газотурбинных двигателей (ГТД) – 50 тыс. ч. Полный назначенный ресурс по горячей части - не менее 7500 полётных циклов, по холодной части - не менее 15000 полётных циклов [1]. В перспективе дальнейшее улучшение характеристик двигателей означает увеличение основных рабочих параметров: степени повышения давления воздуха в компрессоре, температуры газа перед турбиной, частот вращения роторов. Это повысит нагрузки на узлы уплотнений и подшипников.

В работе [2] приведены показатели некоторых уплотнений масляных полостей авиационных двигателей. Произведём сравнение разработанного в СГАУ торцо-

вого газодинамического уплотнения для нагнетателя природного газа с другими типами уплотнений. Чтобы сравнить уплотнения по эффективности герметизации, которую они обеспечивают, используется понятие приведённого эффективного зазора:

$$\bar{d}_{\dot{\gamma}\delta} = \frac{m \cdot d}{D},$$

где μ - коэффициент расхода уплотнения,
 δ - зазор,

D – средний диаметр уплотнительной щели.

Добавим к приведённым данным показатели разработанного в СГАУ торцового газодинамического уплотнения для нагнетателя природного газа. Результаты сравнительного анализа представлены в табл.1.

Таблица 1. Максимальные достигнутые показатели различных типов уплотнений

Тип уплотнения	Перепад давления, МПа	Темп., К	Скорость, м/с	Ресурс, ч	$\bar{d}_{\dot{\gamma}\delta}$
Лабиринтное	0.5	1000	Не огр.	Не огр.	0,336
Щеточное	0.12 на один ряд щеток	1023	400	5000	0,27
РТКУ	0.5	700	100	6 000	0,129
РТУ	0.7	700	150	10000	0,0515
ТКУ	$P \cdot V = 50$ МПа*м/с	500	100	6000	0,075
ТГДУ	35	673	200	18000	0,0176

Анализ параметров рассмотренных типов уплотнений позволяет сделать вывод, что каждая из применяемых конструкций обладает некоторыми недостатками, ограничивающими возможность их использования в качестве уплотнения масляной полости турбомашин. Щёточные и лабиринтные уплотнения имеют явно недостаточную степень герметичности. Уплотнения, обеспечивающие минимальные утечки – ТКУ и РТКУ, имеют ограниченный ресурс. В докладе ЦИАМ "Основные цели развития авиационных двигателей военного и гражданского применения" [3] названы приоритетные научно-технические проблемы, без решения которых невозможно создание двигателя следующего поколения. В ряду этих задач указано создание высокоэффективных уплотнений масляных полостей, работоспособных при высоких скоростях вращения и повышенном давлении. То есть, для достижения перспективных характеристик двигателей существующие на настоящий момент конструкции уплотнительных узлов необходимо усовершенствовать или внедрить новые.

Следует отметить, что уплотнения с газовой смазкой исследовались и успешно развивались в нашей стране. В турбине каскада низкого давления двигателя Д-18Т, созданном для сверхтяжёлых транспортных самолётов: Ан-124, «Руслан» и Ан-125 «Мрия», установлено радиально-торцовое контактное уплотнение (РТКУ). Данное уплотнение двухстороннего действия (двухступенчатое) включает разрезное графитовое кольцо, которое контактирует с торцами двух вращающихся втулок (рис.1).

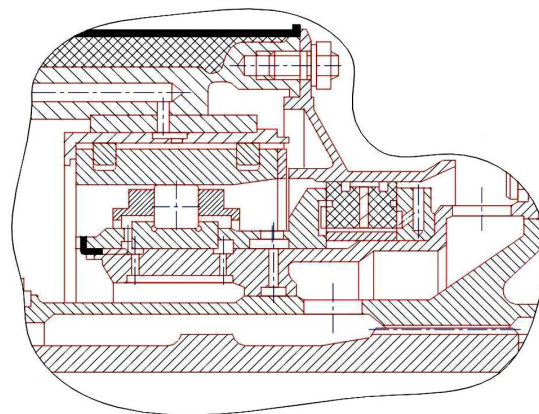


Рис.1. Уплотнение опоры турбины двигателя Д-18Т

Газодинамический эффект в уплотнительных зазорах обеспечивается за счёт наличия камер Рэлея, выполненных на вращающихся втулках. Подвод газа к первой ступени уплотнения осуществляется по специально выполненным каналам в кольце. После чего газ попадает в полость между графитовыми кольцами и далее поступает ко второй ступени уплотнения.

Другим примером применения торцового уплотнения с микроканавками является уплотнение опоры двигателя Д-30Ф6 (рис.2). На торце вращающейся втулки уплотнения выполнено несколько десятков камер Рэлея глубиной 10 мкм. Гарантированный ресурс составляет лишь 1000 часов, а интенсивность изнашивания – 0,006 мкм/ч.

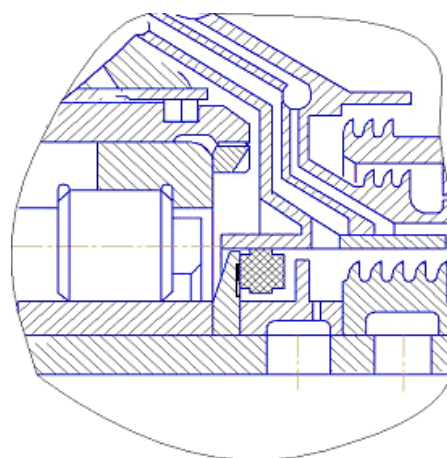


Рис.2. Уплотнение опоры турбины КВД двигателя Д-30Ф6

Приведённые выше примеры уплотнений с микроканавками внедрены более 25 лет назад. В США, Великобритании и ФРГ шло интенсивное изучение бесконтактных уплотнений. ТГДУ, разработанные для стационарных газотурбинных и промышленных установок фирмой «John Crane», достигли следующих параметров: перепад давлений 35 МПа, температура 300 С°, скорость скольжения 180 м/с [4]. Фирма «Feodor Burgmann» создала серию различных уплотнений с газовой смазкой для опор авиационных двигателей [5].

Совершенствование показателей традиционно применяемых ТКУ и РТКУ весьма проблематично. Одним из вариантов решения проблемы является замена контактных уплотнений на торцовые уплотнения с газовой смазкой. Ведущие мировые двигателестроительные фирмы считают, что достичь требуемых в настоящее время параметров и создать полностью электрический, "сухой" двигатель, в котором масло отсутствует, является возможным только с использованием технологии газовой смазки в уплотнительных узлах [6]. Поэтому применение ТГДУ в качестве уплотнения традиционной опоры двигателя позволяет создать задел на будущее. Переход на гибридные опоры и в дальнейшем на магнитный подвес ротора позволит создать для российского двигателестроения доведённый узел с приемлемыми эксплуатационными и ресурсными параметрами.

По пути применения ТГДУ в перспективных двигателях идут и другие страны. В США действовала национальная долгосрочная программа IHPTET (Integrated High Performance Turbine Engine Technology). В её рамках был создан двигатель-демонстратор ХТЕ-77 [7]. Его отличительной особенностью являются магнитные подшипники и торцовые газодинамические уплотнения.

Таким образом, актуальность внедрения ТГДУ подтверждается передовыми разработками.

В СГАУ существует научная школа, занимающаяся разработкой и внедрением уплотнений с газовой и жидкостной смазкой. В течение последних десяти лет на базе разработанных методик были успешно спроектированы и внедрены ТГДУ для нагнетателей природного газа Н-370, НЦ-16, НЦ-25, Н-235, а также высокооборотное ТГДУ для агрегата подачи газа в камеру сгорания конвертированного авиационного двигателя. Созданные методики проектирования, накопленный конструкторский опыт и имеющееся экспериментальное оборудование позволяют вести работы по созданию и доводке узла для уплотнения масляной полости авиадвигателя. В статье предлагается эскизная конструкция перспективного уплотнения для опоры авиационного двигателя.

Принцип работы ТГДУ: в паре трения генерируется тонкий слой газовой смазки. Низкая вязкость газов, используемых в качестве уплотняемой среды, вынуждает иметь механизм для выработки значительного газодинамического давления, с помощью которого достигалось бы разделение рабочих поверхностей для предотвращения непосредственного механического контакта во время работы. Кроме того, слой газа, находящийся в уплотнительном зазоре, должен обладать необходимой жёсткостью, чтобы уплотнение работало устойчиво при кратковременных изменениях внешней нагрузки и других случайных возмущениях. На рис. 3 показана схема ТГДУ. Она состоит из следующих основных элементов: вращающегося диска, на котором выполнены газодинамические камеры (в данном случае спиральные канавки); аксиально-подвижного графитового уплотнительного кольца; упругого элемента; вторичных уплотнений. Вращающийся диск установлен на вал, а аксиально-подвижное уплотнительное кольцо устанавливается в корпус. Газодинамические камеры сообщаются с полостью высокого давления и при вращении вала создают необходимое избыточное давление в зазоре.

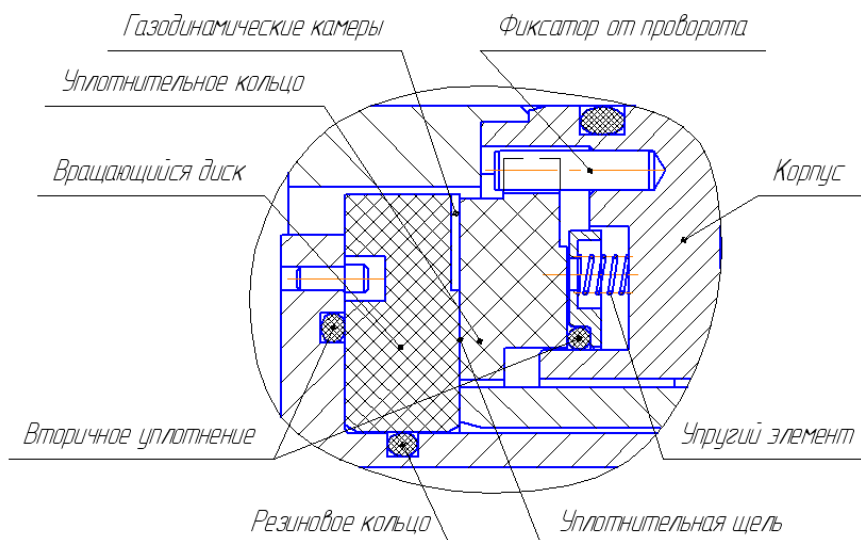


Рис. 3. Схема ТГДУ

Особенность работы уплотнений рассматриваемого типа состоит в способности автоматически обеспечивать некоторую расчётную величину зазора. На рис. 4 представлен график зависимости силы от величины зазора. На аксиально - подвижное кольцо действует в осевом направлении с одной стороны нагружающая сила – W_H , а с другой – сила, равная равнодействующей от распределённого давления в уплотнительном зазоре.

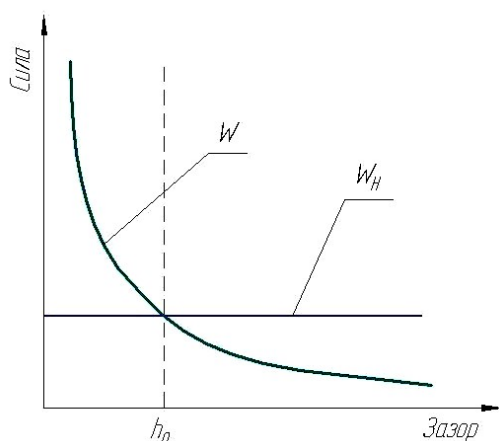


Рис. 4. Зависимость силы от величины зазора

Эту последнюю силу в дальнейшем будем определять как несущую способность – W . При расчётном значении зазора h_0 эти две силы будут взаимно уравновешиваться. В случае уменьшения зазора, вызванного воздействием случайных внешних факторов, резко увеличится не-

сущая способность, графитовое уплотнительное кольцо отодвинется, что приведёт к восстановлению зазора до первоначальной величины. Обратная картина будет наблюдаться при увеличении зазора. Таким образом, реализуется принцип автоматического регулирования.

На уплотнительный узел действуют нагрузки, обусловленные конструкторскими, эксплуатационными, технологическими факторами. При их действии необходимо обеспечить надёжную работу уплотнения. Среди наиболее важных вопросов - изоляция колец пары трения от масла. При возможном попадании масла из полости подшипника в газодинамические камеры и уплотнительную щель ТГДУ возникает опасность резкого увеличения мощности трения, термического искажения уплотнительного зазора и изнашивания уплотнительных поверхностей [8].

Перспективное уплотнение проектируется для средней опоры двигателя семейства «НК» для следующих условий: давление воздуха до 1,2 МПа; температура воздуха до 300°C; скорость вращения ротора до 24000 об/мин. Геометрические параметры уплотнения выбраны с применением разработанных в СГАУ методик [9]. На рисунке 5 приведена полученная зависимость утечек воздуха через уплотнение от скорости вращения ротора. По-

лученные значения утечек существенно ниже, чем у применяемых аналогов.

Уплотнение является единым блоком и имеет интегрированную с подшипником модульную конструкцию.



Рис. 5. Расходная характеристика уплотнения

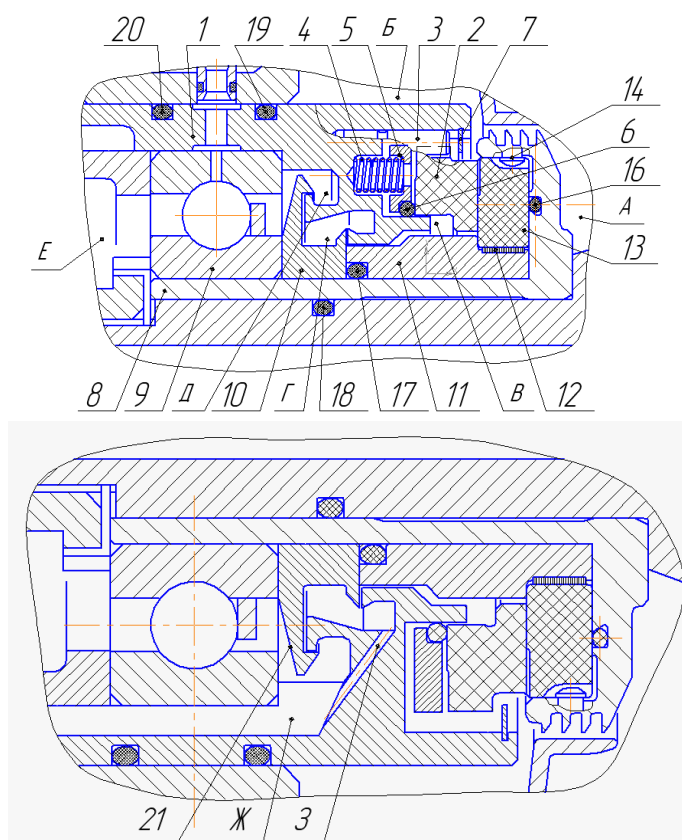


Рис. 6. Конструктивная схема опорно-уплотнительного узла

Статорная часть состоит из втулки уплотнения 1, в которую установлено кольцо уплотнения 2. Для фиксации кольца от проворота во втулке уплотнения устанавливаются штифты 3. Стояночную герметичность обеспечивает усилие от пружин 4, которое через прижим 5 передается на вторичное уплотнение 6 и на кольцо 2, прижимая его к ответному

кольцу 13. Для фиксации кольца 2 от выпадения в осевом направлении используется разжимное кольцо 7, вставляемое в проточку втулки 1. Роторная часть уплотнения состоит из втулки уплотнения 8, на которую установлены подшипник 9, втулка щелевого уплотнения 10 и прижимная втулка 11. В проточку прижимной втулки устанавливается демпфер 12, по которому

центрируется кольцо упорное 13 с газодинамическими канавками. Это кольцо фиксируется от проворота штифтами 14. Герметичность узла обеспечивается установкой эластомерных уплотнительных колец 16, 17, 18, 19, 20. Предлагаются эластомерные кольца серии Kalrez® фирмы «DuPont» [9], работоспособные при температурах до 325°C. Уплотнительный узел разделяет воздушную полость А и масляную полость Е. Для обеспечения чистоты воздуха, текущего через зазор в уплотнительной паре, буферная полость Б наддувается фильтрованным воздухом, давлением большим, чем в полости А. Лабиринтное уплотнение втулки 8 ограничивает попадание воздуха в полость А. Воздух проходит между кольцами 2 и 13 в полость В и далее через систему щелевых уплотнений попадает в полость Е.

Масло в подшипниковую опору подается через наружное кольцо подшипника. Со стороны уплотнения на втулке 10 выполнено маслоотбойное кольцо 21, от-

брасывающее большую часть масла назад к подшипнику. Масло, попадающее в полость Д, сливается в опору через проточку Ж. В случае попадания незначительного количества масла в полость Г оно отбрасывается вторичным маслоотбойным кольцом и стекает через отверстие З.

Щелевые уплотнения используют центробежный эффект и довольно эффективно препятствуют попаданию масла в полость Г. Конструкция этих уплотнений разработана нами с учетом рекомендаций Вернера Хааса из технического университета Штутгарта [10]. При выборе конструктивных параметров щелевого уплотнения использовался расчётный комплекс Fluent. Уплотнение было продуту на номинальном режиме для уровня утечек 0,9 г/с. На рис. 7 показаны полученные поля давлений. Распределение давлений показывает, что утечек достаточно, чтобы надуть полость Г и запереть её от попадания паров масла.

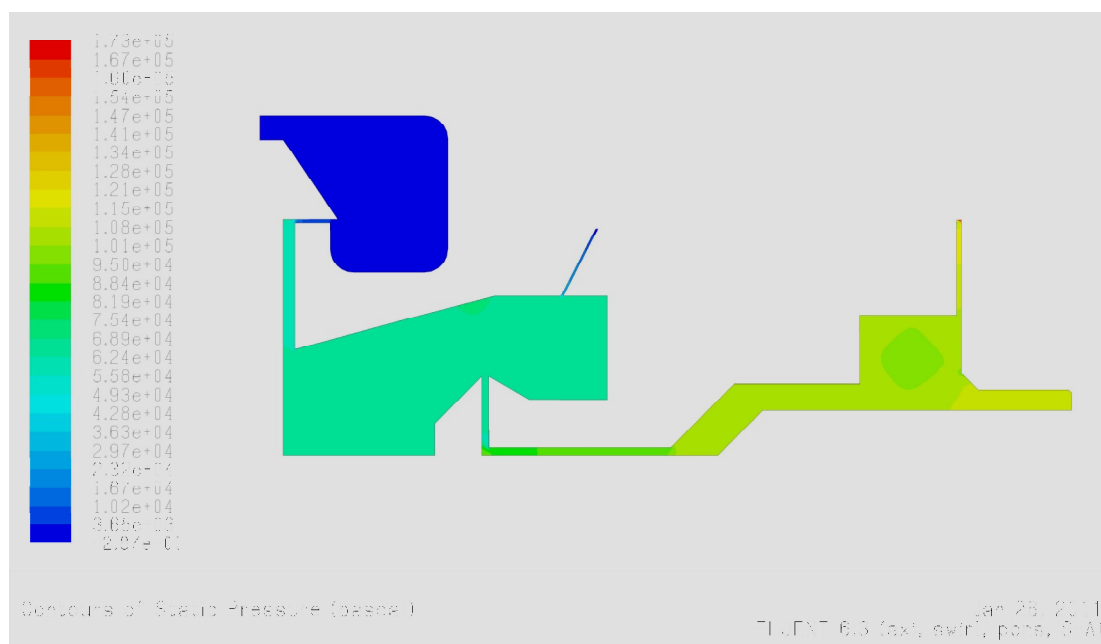


Рис. 7. Расчётные значения поля давлений в щелевом уплотнении

Проектирование ТГДУ производится в рамках работ с ОАО «Кузнецов» и находится на начальном этапе. В дальнейшем планируется провести экспериментальные исследования для того,

чтобы обеспечить работоспособность уплотнения в штатных и нештатных условиях эксплуатации в составе опоры авиационного двигателя.

Библиографический список

1. Скибин, В. А. Работы ведущих двигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей [Текст] / В. А. Скибин, В. И. Солонин. – М.: ЦИАМ, 2004.
2. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели [Текст] / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий – Пермь: ОАО "Авиа-двигатель", 2006.
3. Скибин, В. А. Научный вклад в создание авиационных двигателей [Текст] / В. А. Скибин, В. И. Солонин: под ред. Скибина В. А. — М.: Машино-строение, 2000.
4. Официальный сайт фирмы Джон Крейн [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.johncrane.co.uk/Productfinder.asp?r=ru&l=ru>.
5. Официальный сайт фирмы Бургманн [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eagleburgmann.com/>
6. Федорченко, Д. Г. О перспективе применения в авиационных ГТД элек-

троприводных агрегатов [Текст] / Д. Г. Федорченко, О. А. Гришанов, А. Е. Трянов, Ю. В. Кульков. // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – Самара: СГАУ, 2006.

7. Belousov, A. I. Problems of application of face gasodynamic seals in aircraft engines [Текст] / A. I. Belousov, S. V. Falaleev, A. S. Vinogradov, P. V. Bondarchuk // Russian Aeronautics. – Germany: Springer, 2007.

8. Фалалеев, С. В. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: основы теории и проектирования [Текст] / С. В. Фалалеев, Д. Е. Чегодаев – М.: МАИ, 1998.

9. Официальный сайт фирмы Дюпон [Электронный ресурс]. – URL: http://www2.dupont.com/Photovoltaics/en_US/products_services/high_performance_seals.

10. Официальный сайт IMA [Электронный ресурс]. URL – http://www.ima.uni-stutt-gart.de/dichtungstechnik/skript_dichtungstechnik.pdf.

CONSTRUCTION OF A PROMISING FACE GAS-DYNAMIC SEAL OF THE AIRCRAFT ENGINE

© 2011 P. V. Bondarchuk, S. V. Falaleev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper deals with the prospects and urgency of using front gas-dynamic seals in the aircraft engine. An original construction of the aeroengine front gas-dynamic seal is proposed. This construction minimizes the probability of oil ingress into a tribological pair.

Front gas-dynamic seal, aircraft engine oil chamber sealing, groove seal.

Информация об авторах

Бондарчук Петр Владимирович, ассистент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: область научных интересов: гермотехника и расчеты на прочность. E-mail: bond_ssau@mail.ru.

Фалалеев Сергей Викторович, д.т.н, профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: конструкция авиационных двигателей и их систем, разработка уплотнений с газовой и жидкостной смазкой. E-mail: kipdla@ssau.ru.

Bondarchuk Pyotr Vladimirovitch, assistant of the department of construction and designing of aircraft engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), bond_ssau@mail.ru. Area of research: air tightness and strength calculations.

Falaleev Sergey Victorinovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department of construction and designing of aircraft engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), kipdla@ssau.ru. Area of research: design of aircraft engines and systems, development of gas and liquid-lubricated seals.