

# КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ГАЗОВОЙ СМАЗКОЙ

Фалалеев С.В., Вигурский А.В., Виноградов А.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

В настоящее время в качестве уплотнений опор роторов двигателей широко применяются лабиринтные, торцовые и радиально-торцовые уплотнения. В ряде конструкций малоразмерных ГТД стали использоваться графитовые сегментные уплотнения, ранее широко применявшиеся в ТНА ЖРД. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования различными авторами показали невозможность решения проблемы герметичности опор роторов в целом только с помощью этих уплотнений. То есть, их возможности не перекрывают всего спектра потребностей.

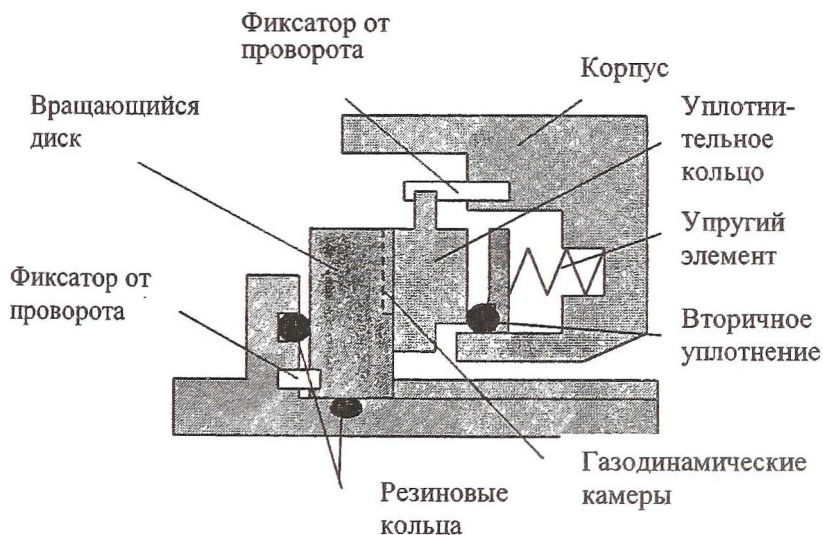


Рис. 1. Конструктивная схема торцового бесконтактного уплотнения

Постоянно повышающиеся требования к надежности, герметичности и весу уплотнений вызывают интерес к торцовым уплотнениям с газовой или жидкостной смазкой, или торцовым бесконтактным уплотнениям (ТБКУ) (рис. 1). На рис. 2 продемонстрирован механизм возникновения гарантированного зазора между уплотнительным кольцом и вращающимся диском. Внешняя осевая сила постоянна при изменении величины зазора. Несущая способность газового слоя (равнодействующая

сил давления со стороны зазора на уплотнительное кольцо) уменьшается с увеличением величины зазора. При равенстве этих сил возникает саморегулируемый зазор.

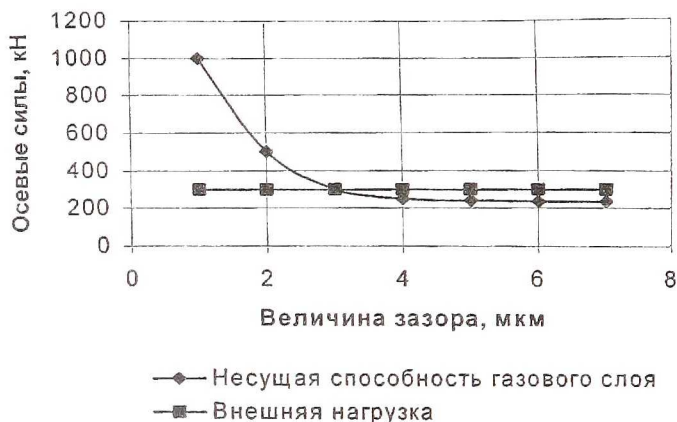


Рис. 2. Изменение раскрывающей и закрывающей уплотнительный стык сил в зависимости от величины зазора

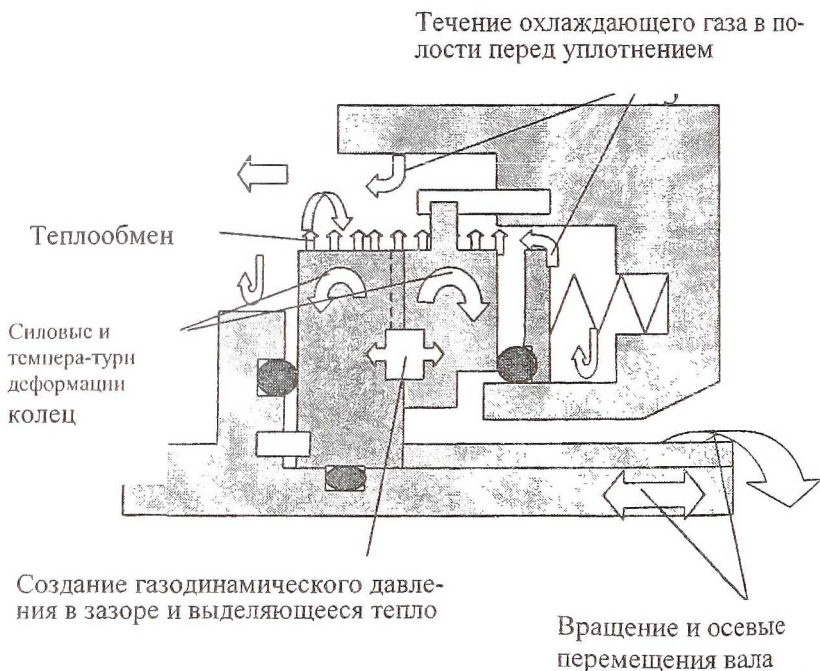


Рис. 3. Основные проблемы, возникающие при проектировании ТБКУ

Правильно спроектированное такое уплотнение должно работать без изнашиваемости пары трения с меньшей утечкой, чем обычное торцовое уплотнение. 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.

Комплекс вопросов, возникающих при проектировании торцовых уплотнений с газовой смазкой, требующих обширного расчетного исследования, представлен на рис. 3 [1].

Особо следует выделить следующие проблемы:

1. Влияние структуры течения уплотняемой (охлаждающей) среды в полости перед уплотнением (формы полости перед уплотнением) на тепловое состояние уплотнения;
2. Влияние геометрии уплотнительных колец на величины тепловых и силовых деформаций, возникающих в них;
3. Влияние деформаций колец на форму и величину уплотнительной щели;
4. Влияние формы и величины уплотнительной щели на распределение давления в зазоре уплотнения;
5. Влияние поля давлений в зазоре уплотнения на величину деформации колец уплотнения;
6. Влияние формы и величины уплотнительной щели на величину выделяющегося тепла в зазоре уплотнения;
7. Влияние величины выделяющегося тепла в зазоре уплотнения на величину деформации колец уплотнения.

Как уже можно заметить, все эти проблемы взаимосвязаны и требуют комплексного решения. Авторами были проведены расчетные исследования характеристик ТБКУ с применением модифицированной программы "TORZS", разработанной на базе оригинальных расчетных методик [[1], а также с помощью пакета на основе МКЭ "ANSYS". Следует заметить, что некоторым полученным расчетным результатам нет аналогов в открытой технической печати. Рассмотрим подробнее обозначенные выше проблемы.

1. Влияние структуры течения уплотняемой среды в полости перед уплотнением на тепловое состояние уплотнения.

Правильное конструирование полости перед уплотнением поможет избежать многих проблем, связанных с охлаждением пары трения, наличием стабильного смазочного слоя и т.п. Распределение параметров рабочей среды (см., например, рис. 7.2 [1]) может быть получено с помощью программы "FLOTRAN", входящей в состав пакета "ANSYS". На работоспособность торцового уплотнения оказывает большое влияние распределение давления, температуры и скорости течения. Данные факторы определяют действительную величину перепада давления на уплотнительной щели, распределение температуры в кольцах, а также связанные с вихреобразованием потери мощности. Например, для снижения деформаций необходимо обеспечить теплоотвод от пары трения через кольцо, выполненное из материала с меньшим коэффициентом линейного расширения и большим коэффициентом теплопроводности. Это обеспечивается формированием поля скоростей охлаждающей среды. Обычно обеспечивается интенсивный теплоотвод от вращающегося кольца (рис. 4) [2]. Расчетным путем можно выбрать способ подвода рабочего газа к уплотнению и геометрию полости перед уплотнением, обеспечивающие благоприятное распределение параметров потока. Также с помощью программы "FLOTRAN" можно рассчитать действительные величины коэффициентов конвективного теплообмена по периметру уплотнительных колец.

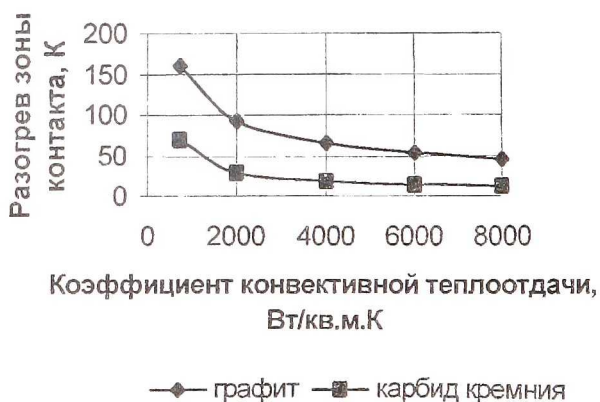


Рис. 4. Влияние материала и охлаждения кольца на величину температуры в зоне контакта

## 2. Влияние геометрии уплотнительных колец на величины тепловых и силовых деформаций, возникающих в них

Форма уплотнительного кольца влияет на его изгибную жесткость и поле температур, что напрямую связано с величинами деформаций колец. На рис. 5 продемонстрировано влияние геометрии уплотнительного кольца на величины возникающих в них изгибных колебаний.



Рис. 5. Влияние геометрии кольца на величину деформации

В данном случае рассматриваются деформации в виде конусности торцевой уплотнительной поверхности от перепада давления на уплотнении. За положительное значение конусности принято такое, при котором происходит раскрытие уплотнительного стыка по его наружному диаметру (со стороны уплотняемой полости), когда реализуется конфузорный зазор. В качестве регулирующего параметра взято значение внешнего радиуса уплотнительного кольца, в котором находятся углубления для фиксаторов от проворота (см. рис. 1), при неизменных других геометрических параметрах. При уменьшении этого радиуса происходит смещение центра тяжести сечения и кольцо начинает деформироваться в другую сторону.

## 3. Влияние деформаций колец на форму и величину уплотнительной щели

Деформации уплотнительных поверхностей колец изменяют форму зазора, что вызывает перераспределение эпюры давления по ширине уплотнительного пояска. Так как в уплотнении реализуется равенство действующих на уплотнительное кольцо сил, закрывающих и раскры-

вающих уплотнительный стык, то перераспределение эпюры давления вызывает изменение минимального зазора (рис. 6).



Рис. 6. Влияние конусности уплотнительной поверхности на характеристики уплотнения

Все это вызывает изменение утечек через уплотнительный стык (рис. 7). Анализ расчетных результатов на рис. 6 и 7 показывает, что диапазон возможных искажений зазора невелик. При небольшой диффузорности зазора происходит контакт уплотнительных поверхностей, при увеличении конусности зазора резко растут утечки



Рис. 7. Влияние конусности уплотнительной поверхности на характеристики уплотнения

#### 4. Влияние формы и величины уплотнительной щели на распределение давления в зазоре уплотнения.

Влияние формы и величины уплотнительной щели на перераспределение эпюры давления в зазоре уплотнения описано частично в предыдущем пункте. Как уже отмечалось выше, несущая способность газового слоя остается неизменной. Однако перераспределение эпюры давления вызывает изменение радиуса действия ее результирующей, то есть изменение величины изгибающего момента, действующего на кольцо со стороны уплотнительного зазора. Это продемонстрировано на рис. 8. При этом изменение конусности уплотнительной поверхности никак не сказывается на величине изгибающего момента со стороны внешних сил, который направлен в противоположную сторону. В итоге при работе уплотнения устанавливается величина конусности, при которой величины обоих моментов равны. Эта величина конусности зависит от геометрических параметров уплотнительного кольца и свойств материала, которые определяют величину радиальной усадки кольца при действии перепада давления (см. рис. 8).

#### 5. Влияние поля давлений в зазоре уплотнения на величину деформации колец уплотнения.

На рис. 8 продемонстрировано изменение изгибающего момента со стороны уплотнительного слоя при изменении поля давления. Изменение поля давления было вызвано деформацией уплотнительного кольца.

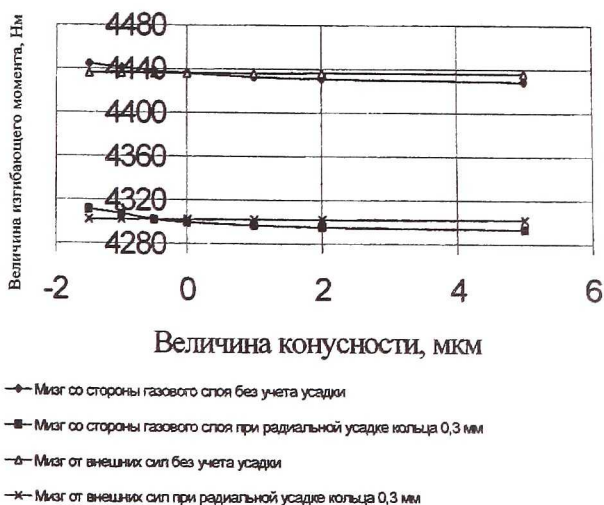


Рис. 8. Изменение изгибающих моментов, действующих на уплотнительное кольцо

На рис. 9 представлено изменение изгибающего момента, связанного напрямую с величиной деформаций, в зависимости от длины спиральных канавок. Длина спиральных канавок также во многом определяет эпору давления в уплотнительном зазоре.

6. Влияние формы и величины уплотнительной щели на величину выделяющегося тепла в зазоре уплотнения.

Мощность трения зависит от площади уплотнительного стыка и обратно пропорциональна величине зазора. Наличие конусности уплотнительных поверхностей также оказывает влияние на количество выделяющегося тепла (рис. 10). Так как кольца более нагреты со стороны уплотнительного зазора, то при температурных деформациях происходит раскрытие зазора со стороны наружного диаметра (величина конусности изменяется в сторону увеличения конфузорности зазора). Однако при этом снижается мощность трения.



Рис. 9. Изменение изгибающего момента при изменении длины спиральных канавок



Рис. 10. Изменение мощности трения при различной форме зазора. Поэтому тепловая задача является сходящейся.



## 7. Влияние величины выделяющегося тепла в зазоре уплотнения на величину деформации колец уплотнения.

Выделяющееся в зоне трения тепло приводит к возникновению температурного поля в уплотнительных кольцах. Наибольшая температура в зоне контакта. Поэтому возникают температурные деформации колец. Очевидно, что чем выше мощность трения, тем больше величина деформаций. В различных литературных источниках доказано [1], что мощность трения вызывает разогрев зоны контакта и все тепло уходит в контактирующие кольца. В ТБКУ утечки газа незначительны, и уносимым с утечками теплом можно пренебречь. На рис. 11 совместно представлены две зависимости: изменение величины конусности уплотнительной поверхности, возникающей в результате деформаций, от мощности трения; изменение мощности трения при изменении формы зазора. На рис. 11 условно взято, что уплотнительное кольцо уже имеет деформацию величиной  $-1\text{мкм}$  от действия на него перепада давления.



- Выделяющаяся в зазоре теплота при различной форме зазора
- ▲— Деформации от выделяющегося в зоне трения тепла

Рис. 11. Определение величины конусности зазора в тепловой задаче

Очевидно, что при работе уплотнения установится величина конусности, при которой обе эти характеристики пересекаются. Однако необходимо заметить, что кольца расширятся при повышении температуры и величину действительной радиальной усадки кольца нужно скорректировать.

В вышеприведенных исследованиях рассматривается деформации поверхности уплотнительного кольца в виде конусности. Однако в действительности форма уплотнительной поверхности обладает незначительной криволинейностью. Это может привести к необходимости корректировки результатов. Программа “TORZS” позволяет рассчитывать газодинамические характеристики уплотнения с зазором сложной формы, и у авторов уже накоплен опыт совместного использования этой программы с пакетом “ANSYS”.

Анализ приведенных выше результатов и накопленный авторами опыт создания ТБКУ для нагнетателей природного газа позволили предложить алгоритм комплексного проектирования торцовых уплотнений с газовой смазкой:

1. Первоначальный выбор геометрии уплотнительных колец, параметров упругого элемента и вторичного уплотнения; грубая оценка характеристик газового слоя в уплотнительной щели и теплового состояния уплотнения;
2. Формирование полости перед уплотнением, выбор оптимальной геометрии, обеспечивающей наибольшие коэффициенты теплоотдачи на поверхности уплотнительных колец;
3. Исследование влияния геометрии уплотнительных колец на величины тепловых и силовых деформаций, возникающих в них; выбор оптимальной геометрии;
- 3.1. Выбор геометрии уплотнительных колец при условии плоскопараллельного зазора;
- 3.2. Расчет гидродинамических характеристик слоя газа в щели уплотнения с учетом возможности истечения газа из щели со скоростью звука; определение величины уплотнительной щели;
- 3.3. Расчет величин силовых деформаций; уточнение формы щели уплотнения;
- 3.4. Повторный расчет по п.п. 3.2 и 3.3; определение величины и формы уплотнительной щели методом итераций;
- 3.5. Расчет величины выделяющегося тепла в зазоре уплотнения;
- 3.6. Определение распределения температуры в кольцах уплотнения и величины тепловых деформаций; уточнение формы уплотнительной щели;

- 3.7. Повторный расчет по п.п. 3.2...3.6; уточнение величины и формы уплотнительной щели;
4. Уточнение геометрии уплотнительных колец и полости перед уплотнением; в случае необходимости проведение повторного расчета;
5. Расчет характеристик уплотнения (утечки, жесткость газового слоя).

Предлагаемый алгоритм может быть реализован вручную с привлечением различных методических и программных средств. Однако трудоемкость такого выполнения алгоритма очень велика и требует высочайшей квалификации исполнителя. Поэтому представляется разумным создание программного комплекса для его выполнения.

На наш взгляд целесообразно использовать пакет на основе МКЭ «ANSYS», в котором можно проводить тепловые расчеты, определение силовых деформаций и расчет течения газа в полости перед уплотнением. Так как «FLOTRAN», являющийся составной частью «ANSYS», еще не достаточно адаптирован для решения специальных задач из области гидродинамики, то для расчета характеристик газового слоя сложной формы необходимо использовать программы, разработанные на кафедре КиПДЛА СГАУ. Возможно, что не удастся запустить на выполнение весь алгоритм нажатием лишь одной кнопки. Однако с его помощью любой инженер, представляющий себе физику протекающих в уплотнении процессов, может достаточно быстро провести проектирование торцового бесконтактного уплотнения.

#### Список литературы

1. Фалалеев С.В., Чегодаев Д.Е. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: Основы теории и проектирования: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 276 с.
2. Mueller G.S. Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid. Berichte aus IMA Universitaet Stuttgart, N 48, 1993. – 107 S.