

## РЕГУЛИРОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.

Фалалеев С.В., Балякин В.Б., Виноградов А.С..

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Среди многочисленных требований, предъявляемых к современным уплотнениям, таких как сохранение работоспособности при температурах до 1700 К, перепадах давления до 7 МПа, окружных скоростях до 250 м/с в течение назначенного ресурса от 30000 часов, отдельное место занимает обеспечение многорежимности уплотнения. Это особенно актуально для авиационных ВРД, которые имеют несколько рабочих режимов со строго определенным временем работы на каждом из них. Такое требование справедливо и для газотурбинных приводов нагнетателей газоперекачивающих агрегатов.

Уплотнение энергетической установки, равно как и любой другой узел, проектируется, исходя из условий работы, присущих основному (максимально продолжительному) режиму работы. Однако, следует помнить, что нагрузки, возникающие на прочих режимах и действующие на самый уязвимый элемент уплотнительного узла с торцевым уплотнением - аксиально подвижное кольцо, могут вызвать повышенные деформации этого кольца и, как следствие, невозможность обеспечения нормальной работы всего уплотнения на расчетном режиме. Поэтому, для достижения заданных значений ресурса, при проектировании уплотнения необходимо решать задачу регулирования, целью которой является определение уровня деформаций уплотнительных колец при данных условиях нагружения и, если это необходимо, выбор методов и средств для получения требуемой формы зазора.

В качестве примера, для иллюстрации задачи регулирования, в работе выбрано торцовое бесконтактное уплотнение (ТБКУ), работающее в газовой среде, в котором гарантированный зазор между парой трения обеспечивается возникновением газодинамического давления в спиральных канавках, выполненных на вращающемся кольце. Данное уплотнение спроектировано для нагнетателя природного газа 370-18-1.

В самом общем виде задача регулирования должна быть подразделена на следующие основные этапы:

1. Расчетное определение деформаций, возникающих на уплотнительном кольце, при параметрах исследуемого режима, определение возникающих утечек и сравнение полученных значений с допустимыми;

2. Выбор принципа, метода и средства регулирования для обеспечения приемлемых уровней герметичности и деформаций;

3. Анализ располагаемого диапазона форм уплотнительного зазора (деформаций графитового кольца) и выбор той из них, которая оптимально соответствует предъявляемым требованиям;

4. Анализ устойчивости работы уплотнительного узла.

Рассмотрим последовательно все вышеперечисленные этапы.

Расчет деформаций уплотнительного кольца ведется методом конечных элементов с помощью программных комплексов, основанных на этом методе, таких как "ANSYS" или "ИСПА". Однако, применение этих комплексов имеет одну важную особенность: исходными данными для проведения расчета служат значения действующих на кольцо нагрузок (в том числе со стороны зазора), а выходными являются значения возникающих деформаций. В рассматриваемом торцовом уплотнении со спиральными канавками газодинамическое давление в зазоре определяется формой зазора, иначе - уровнем деформаций кольца. Таким образом, чтобы определить газодинамическое давление в зазоре, необходимо знать значение деформаций. Снять образовавшееся противоречие может применение дополнительной расчетной программы, в которой по заданной форме зазора, получаемой с помощью МКЭ, определяются значения давлений на различных радиусах уплотнительного торца. Уплотнение со спиральными канавками является самоустанавливающимся, т.е. чем больше зазор, разделяющий потенциальную пару трения, тем меньше возникающее в нем газодинамическое давление. Справедливо и обратное утверждение. Суть метода состоит в том, чтобы отыскать то значение минимального зазора при определенной форме, при котором несущая способность и нагружающая сила совпадали бы с заданной точностью. С помощью данной программы, полученный массив давлений в уплотнительном зазоре при уравновешенном кольце, сравнивается с априорно заданным массивом давлений в конечноэлементном расчете. При несовпадении этих значений следует выполнить несколько итераций, переходов, до того момента когда необходимая точность будет достигнута.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧПЛОТНЁИЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

АКТИВНЫЙ

АДАПТИВНЫЙ

ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ЛИНЕЙНЫЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ РЕЛЕЙНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ

ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ  
СИЛАМИ

КОНСТРУКТИВНЫМИ  
СРЕДСТВАМИ

СВОЙСТВАМИ  
ПРИМЕНЯЕМЫХ  
СРЕД

ДЕМПФИРОВАНИЕМ

изменением силы  
упругого элемента  
изменением вели-  
чины давления в  
зазоре  
применением  
центробежного  
эффекта  
изменением радиуса  
положения вторич-  
ного уплотнения  
применением эффек-  
та различного  
температурного  
расширения  
применением дефор-  
мируемой поверх-  
ности уплотни-  
тельного кольца  
изменением схемы  
уплотнения  
изменением гид-  
равлического  
сопротивления  
щели  
изменением длины  
щели

ВИДЫ СРЕД

разделяемые  
промежуточные  
охлаждающие

состав  
температура  
давление  
плотность  
режим течения  
вязкость

Рис. 1. Классификация методов, законов, принципов и средств регулирования ТБКУ

После определения достоверных значений деформаций и расхода через уплотнение (утечек) должен быть осуществлен второй этап задачи регулирования, при котором определяется средство, с помощью которого должны обеспечиваться необходимые характеристики уплотнения. Классификация возможных методов, принципов и средств регулирования приведена на рис. 1.

Главными методами, благодаря которым осуществляется регулирование, являются активный и адаптивный методы. Применение активного метода основано на подведении энергии от внешнего, независимого источника к выбранному для регулирования элементу уплотнения. Адаптивный метод, основан на изменении характеристик уплотнения за счет тех возможностей, которые заложены в конструкцию при проектировании уплотнительного узла. К адаптивному методу следует отнести те средства, которые реализуются при работе уплотнения (применение колец с приклеенными биметаллическими пластинами, использование каскада пружин, вступающих в работу последовательно, по мере увеличения деформации кольца, изменение газодинамического давления путем варьирования глубиной спиральных канавок или камер Рэлея, использование воздействия центробежных сил и т.п.).

Во многих случаях бывает важным определить тот закон, по которому изменяются характеристики уплотнения (закон регулирования). Такими законами могут быть: линейный, экспоненциальный, релейный и комбинированный. Применение того или иного закона зависит от конкретных задач и требований, предъявляемых к уплотнительному узлу.

К основным принципам регулирования уплотнений относятся: регулирование свойствами применяемых сред (где в качестве сред могут рассматриваться разделяемые, промежуточные и охлаждающие среды, а в качестве свойств - давление, плотность, температура, вязкость и режим течения (ламинарный или турбулентный)), регулирование конструктивными средствами, регулирование с помощью электромагнитных сил и применение демпфирования.

Регулирование конструктивными средствами является самой большой группой. Сюда относятся: изменение силы упругого элемента, изменение величины и распределения давления в зазоре, применение центробежного эффекта, изменение радиуса положения вторичного уплотнения, применение эффекта различного температурного расширения, использование колец с деформируемой уплотнительной

поверхностью, изменение схемы уплотнения, изменение гидравлического сопротивления щели, изменение длины щели.

Выбрав приемлемые метод, принцип и средство регулирования, следует перейти к третьему этапу поставленной задачи. Цель этого этапа заключается в определении возможного уровня деформаций, исходя из предъявленных требований и ограничений.

Основными критериями, которыми необходимо руководствоваться на данном этапе являются:

1. Величина утечек - фактор определяющий герметичность уплотнения на исследуемом режиме;

2. Минимальный зазор. Его величина не должна быть такой, при которой возможно касание, с одной стороны, и такой, чтобы утечки не превысили некое заданное значение - с другой. Проведенные исследования уплотнения со спиральными канавками показывают, что оптимальное значение минимального зазора составляет примерно треть от глубины спиральных канавок и находится в диапазоне 2...3 мкм.

3. Жесткость смазочного слоя. Этот параметр важен для обеспечения устойчивости положения уплотнительного кольца.

Наилучшей, с точки зрения величины утечек, является строго параллельная форма зазора. Однако такая форма имеет ряд недостатков. Во-первых в реальной конструкции добиться ее практически невозможно, а во-вторых, исходя из того, что наиболее благоприятной формой распределения давления в зазоре уплотнения является выпуклая эшора, обеспечивающая повышенную несущую способность уплотнения и способствующая демпфированию в колебательной системе, поверхность уплотнительного кольца даже рекомендуют делать слегка деформируемой.

Анализ различных форм зазора показывает, что в зависимости от того как представить форму, можно получить разницу в величине утечек более чем в 1,5 раза (см. рис.2). Этот вывод является важным, т.к. многие фирмы, разрабатывающие уплотнения, как отечественные, так и зарубежные, ограничиваются анализом исключительно конусной формы зазора, которая как видно из рис. 2 и 3 является далеко не оптимальной.

Сравнение форм зазора проводилось двумя методами: исследование при постоянном минимальном зазоре (изменяются утечки, несущая способность и жесткость смазочного слоя) (рис. 2), и исследование при постоянных нагрузках на уплотнение (изменяются утечки, минимальный зазор и жесткость смазочного слоя) (см. рис. 3).

Анализ рисунков 2 и 3 показывает, что, например, форма зазора А имеет максимальную жесткость смазочного слоя и значение минимального зазора, близкое к плоскопараллельному. И, хотя утечки при рассматриваемой форме отличаются от плоскопараллельного случая примерно на 15%, следует отметить, что такую форму гораздо легче обеспечить в реальной конструкции. Те же самые рассуждения относятся, например, к форме В.

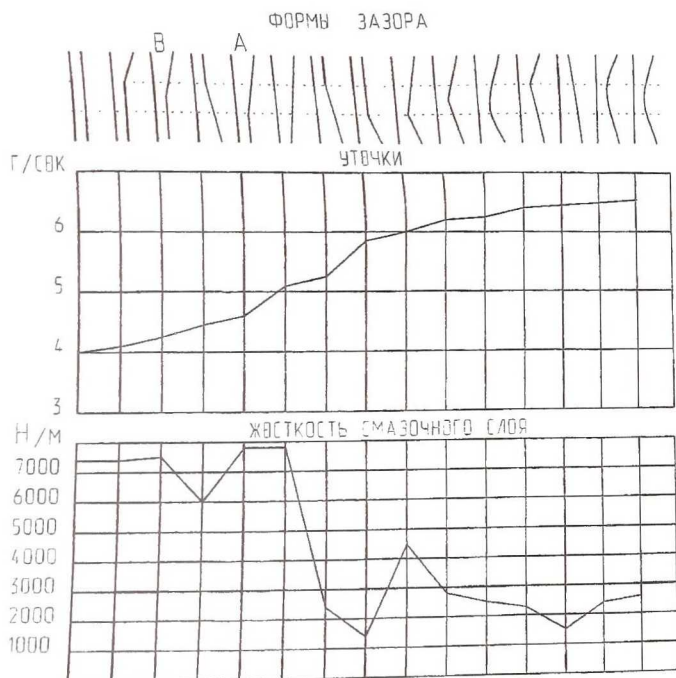


Рис. 2. Сравнение форм зазора при постоянном минимальном зазоре

Следует также отметить, что достижение различных форм не является абстракцией, а вполне осуществимо в реальных конструкциях применением бандажированных (составных) колец, колец с биметаллическими пластинами, постановкой каскада тарельчатых пружин, применением вставок из материала МР на уплотнительной поверхности, нанесением фторопластовых (или других легко деформируемых) покрытий на дно спиральных канавок, изменением жесткости колец, составляющих пару трения, под действием

центробежных сил и т.д. С целью обеспечения заданной формы на рабочем режиме, в исследованном уплотнительном кольце специально отбирался размер нижнего гибкого выступа X (см. рис. 4). Его жесткость и баланс действующих на него нагрузок определялись таким образом, чтобы форма зазора была близка к форме А (рис.2.).

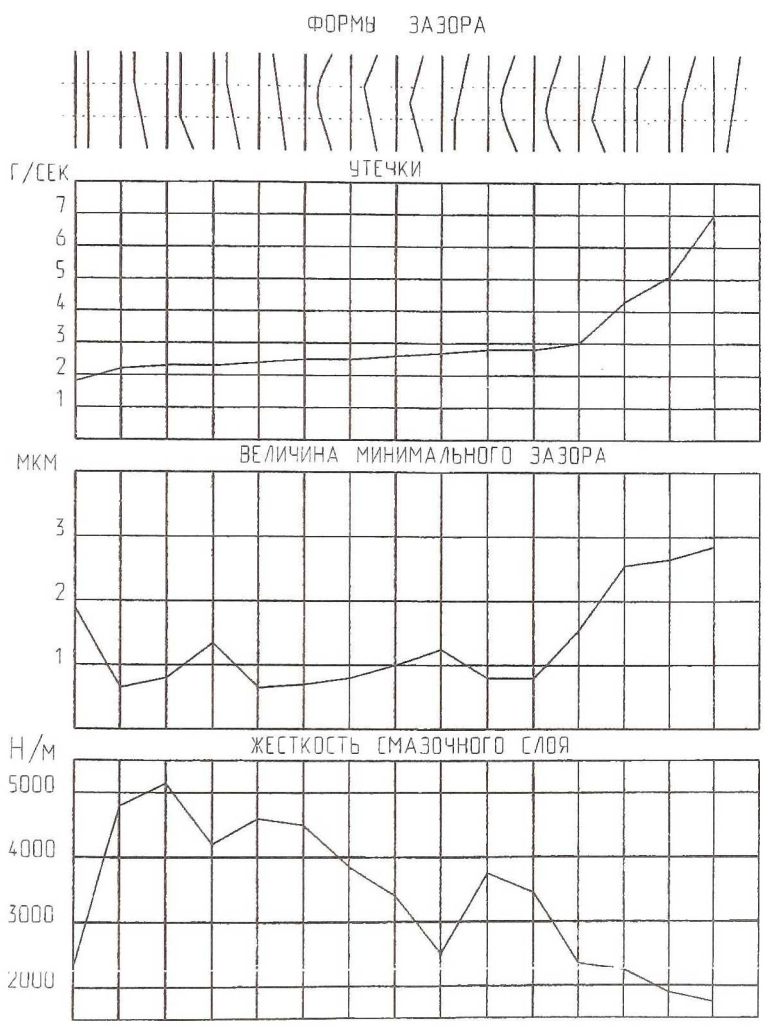


Рис. 3. Сравнение форм зазора при постоянных нагрузках на уплотнение

Завершающим разделом задачи регулирования должен служить анализ устойчивости уплотнительного узла. Регулировать возможно только то, что устойчиво. Цитируя И. Канта можно отметить, что: "Только постоянное - изменяется; изменчивое подвергается не изменению, а только смене, состоящей в том, что некоторые определения исчезают, а другие возникают". В целом анализ устойчивости уплотнительного узла состоит из трех основных разделов:

1. Анализ устойчивости уплотнительного узла, как отдельной системы.
2. Анализ устойчивости отдельных элементов уплотнения. Так, например, в рассматриваемой конструкции при доводке, с целью достижение минимальных деформаций на основном режиме была значительно уменьшена ширина нижнего выступа сечения уплотнительного кольца. Более податливый, чем основное кольцо, нижний выступ является с одной стороны удобным средством для регулирования (чтобы обеспечить желаемую форму зазора), но с другой стороны, он наиболее подвержен возможным автоколебаниям, которые вполне могут возникнуть из-за окружной неравномерности распределения давления, вызванной технологическими отклонениями или деформациями. Последнее обстоятельство заставляет проводить исследования устойчивости уплотнения пользуясь динамической моделью, в которой уплотнительное кольцо (рис. 4 а) рассматривается, как состоящее из двух частей, связанных друг с другом упруго-демпферными элементами. Оба элемента, составляющие неподвижное кольцо соединяются при этом с вращающимся кольцом при помощи газодинамических сил, возникающих в зазоре (рис. 4 в).

Ясно, что если один из элементов уплотнения является не устойчивым, то ни о какой сходимости расчетных и экспериментальных данных говорить не приходится. В исследованном примере собственная частота уплотнительного кольца превышала 8000 Гц, а собственная частота отдельно взятого гибкого бурта, рассматриваемого как пластина жестко закрепленная по внешнему ободу,



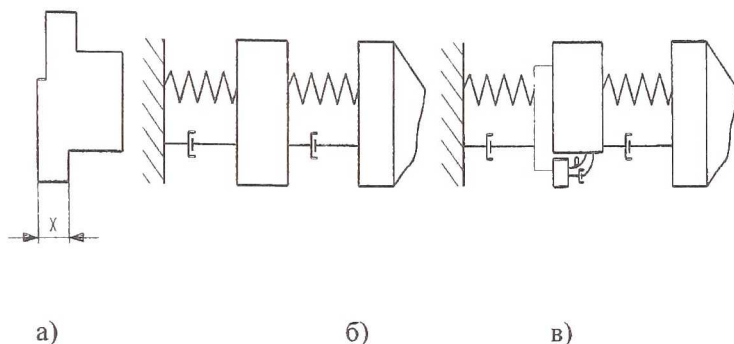


Рис. 4. Динамическая модель уплотнения с уплотнительным кольцом (а) без учета влияния гибкого бурта (б) и с его учетом (в)

превышала 10000 Гц. Т.к. полученные собственные значения частот значительно превосходят рабочую частоту, то для данного этапа анализа следует сделать вывод, что элементы системы регулирования устойчивы.

### 3. Анализ устойчивости самого процесса регулирования.

Рассмотренные этапы для решения задачи регулирования применительно к уплотнительному узлу направлены на дальнейшее совершенствование процесса проектирования уплотнений. Многие из подразделов являются недостаточно разработанными, а иные при проектировании до настоящего времени вовсе не рассматривались, что было связано с несравненно большими возможностями экспериментальной доводки. В современных условиях основной труд по доводке уплотнения перекладывается с экспериментатора на конструктора и поэтому разработка поставленных в работе задач является необходимой.