

## ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТБКУ

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

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Среди применяемых в настоящее время уплотнений одним из наиболее перспективных является торцовое бесконтактное уплотнение (ТБКУ). Однако, для того чтобы уплотнение безотказно работало в течение назначенного ресурса, необходимо выдержать два основных условия: уплотнение должно быть правильно спроектировано для основного режима работы и иметь возможности для регулирования на переходных режимах. Эта задача будет в дальнейшем именоваться задачей регулирования ТБКУ, которая, в свою очередь, содержит две проблемы: обеспечение статической устойчивости пары трения на основном режиме и применение дополнительных методов и средств регулирования на продолжительных переходных режимах.

При работе ТБКУ на основном режиме на уплотнительное кольцо действуют два типа нагрузок (см. рис. 1). Один вид, который определяется как нагружающая сила –  $W_c$ , обусловлен действием давления уплотняемой среды и упругого элемента и остается неизменным при любых значениях оборотов ротора. Другой вид – несущая способность ( $W_0$ ) – представляет собой силу от распределенного давления газа в зазоре, которое, в свою очередь, складывается из газодинамической и газостатической составляющих. Величина газодинамического эффекта определяется величиной частоты вращения ротора. В правильно спроектированном уплотнении на основном режиме реализуется принцип саморегулирования; т.е. при незначительном изменении величины зазора (например, при его увеличении) давление в зазоре уменьшается, но так как нагружающая сила сохраняется постоянной, то уплотнительное кольцо перемещается в сторону уменьшения зазора, чем восстанавливается равновесие уплотнительного кольца. При уменьшении зазора наблюдается обратная последовательность. Если пара трения способна самоустанавливаться, то такое уплотнение будет устойчивым.

Однако, понятно, что для обеспечения необходимой устойчивости при работе, уплотнение должно быть спроектировано для жестко заданных параметров уплотняемой среды, а сами кольца, составляющие пару трения, быть изготовленными с максимально возможной степенью точности и при этом, уплотнение будет надежно работать только в том случае, если будет достигнут баланс между моментом, действующим на неподвижное уплотнительное кольцо, от нагружающих сил и моментом, действующим со стороны газового слоя (см. рис. 2), т.к. только при равенстве моментов уплотнение будет работать с плоскопараллельным зазором и иметь удовлетворительное значение ресурса.

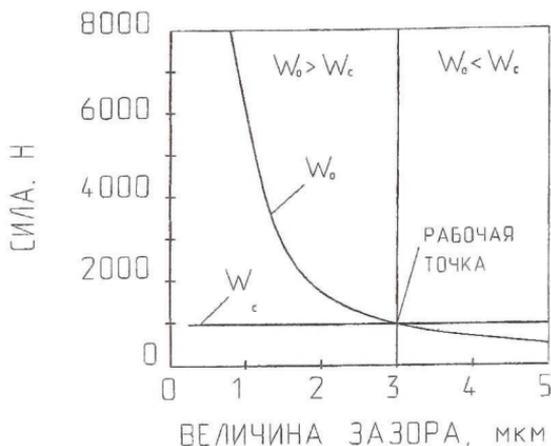


Рисунок 1 - Принцип работы ТБКУ

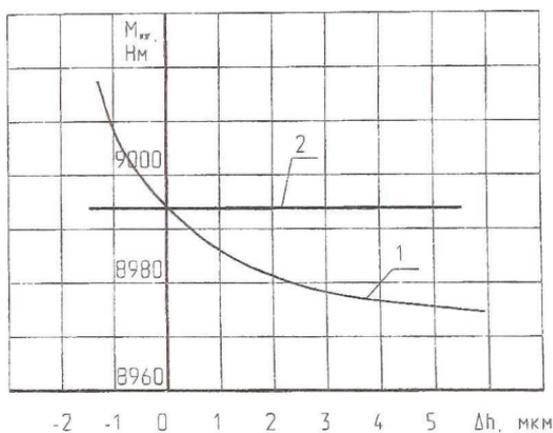


Рисунок 2 - Моменты от силы газового слоя (1) и нагружающей силы (2), действующие на уплотнительное кольцо

В работе учитывалось влияние на характеристики ТБКУ усадки уплотнительного кольца. В данном случае, под усадкой можно понимать изменение всех радиальных размеров уплотнительного кольца вследствие действия перепада давления. Аналогичное влияние на характеристику уплотнения оказывает также разница в размерах, которая возникает при изготовлении колец из-за погрешностей оборудования (в исследуемом уплотнении поле допуска составляло величину равную приблизительно

300 мкм), или изменение характеристик в зависимости от различных применяемых материалов (материал с меньшим модулем упругости будет иметь большую величину усадки). На рис. 3 показаны зависимости изгибающего момента, действующего со стороны газового слоя от конусности (величины деформации) неподвижного уплотнительного кольца для кольца с номинальными радиальными размерами и для кольца, имеющего усадку. Как в первом, так и втором случае, при изменении деформации в диапазоне от  $-2$  до  $+2$  мкм изгибающий момент, действующий со стороны слоя, снижается примерно на одну и ту же абсолютную величину, однако для одного значения конусности значения моментов отличаются на величину порядка 150 Нм. Это означает, что если пара трения спроектирована для условий, соответствующих кольцу с номинальными размерами, то кольцо, изготовленное на нижней границе полей допусков радиальных размеров не будет работоспособным при приложении заранее определенной нагружающей силы.

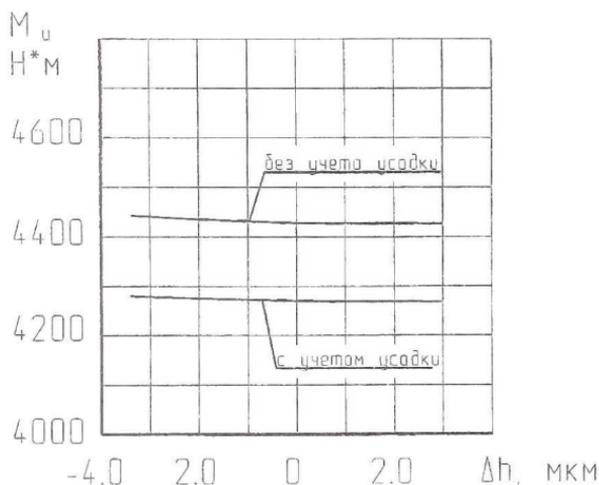


Рисунок 3- Влияние усадки уплотнительного кольца на величину изгибающего момента, действующего со стороны газового слоя

Конечно, следует признать, что наряду с изгибающим моментом от газового слоя изменится также и момент от нагружающих сил, т.к. изменится, например, радиус приложения усилия пружины. Но расчетные исследования показали, что величина изменения момента от нагружающих сил мала и даже приблизительно не компенсирует изменение момента, действующего со стороны газового слоя.

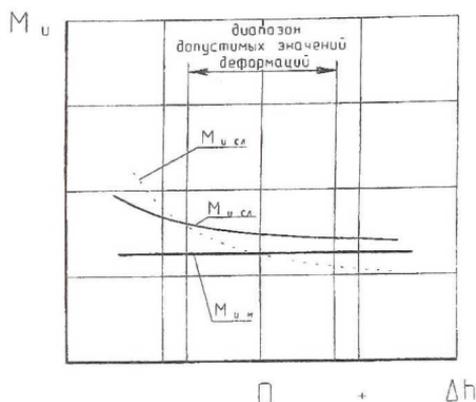
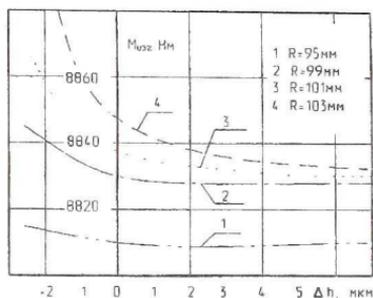


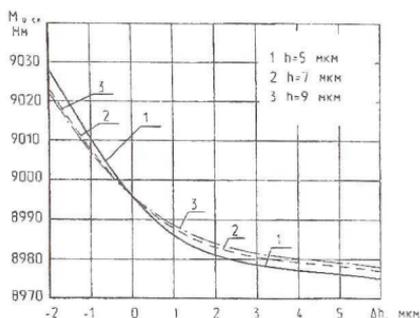
Рисунок 4 - Влияние характера зависимости изгибающего момента от величины деформации на работоспособность уплотнения

В исследуемой конструкции сухого уплотнения зависимость изгибающего момента от величины конусности имеет достаточно пологий характер (рис. 3) и при изменении радиальных размеров деформации уплотнительного кольца выходят за границы допустимых. Чтобы уплотнение было менее чувствительно к влиянию технологических погрешностей или деформациям, необходимо, чтобы зависимость изгибающего момента от величины деформации имела бы больший наклон (пунктирная линия на рис. 4). В этом случае при изменении радиальных размеров будет возможным достигнуть равенства двух моментов, действующих на уплотнительное кольцо и сохранить, тем самым, работоспособность всего уплотнения.

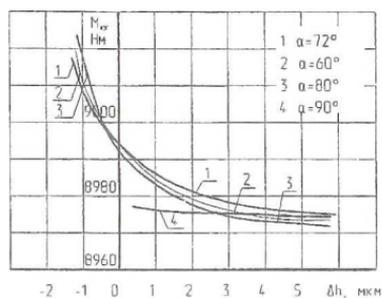
Однако для того чтобы изменить характер зависимости изгибающего момента, действующего со стороны газового слоя, от величины деформации на практике, необходимо чтобы вся регулируемая система обладала определенной чувствительностью к управляющему воздействию. Эта чувствительность во многом определяется геометрическими характеристиками, заложенными при проектировании уплотнительного кольца. В этой связи интересные результаты были получены при исследовании влияния радиуса расположения спиральных канавок на способность уплотнения к саморегулированию. На рис. 5а показаны зависимости изгибающего момента от конусности зазора для различных значений радиусов расположения спиральных канавок. Анализ этого рисунка показывает, что при малых значениях радиусов (например, при  $R=95$  мм) при изменении конусности величина изгибающего момента, действующего на уплотнительное кольцо, практически не изменяется.



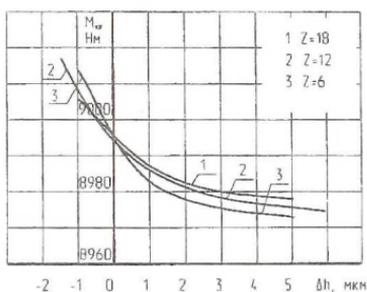
а



б



в



г

Рисунок 5 - Зависимость изгибающего момента от значения радиуса расположения спиральных канавок - а, от глубины спиральных канавок - б, величины угла наклона спиральных канавок - в, числа спиральных канавок - г

Такое уплотнение является несовершенным с точки зрения возможности саморегулирования, при незначительном изменении изгибающего момента деформации уплотнительного кольца могут измениться на порядок. Напротив, при больших значениях радиуса ( $R=103$  мм) с небольшим изменением конусности очень резко изменится изгибающий момент, что значительно уменьшает диапазон возможных отклонений формы зазора от плоскопараллельной. Таким образом, при проектировании уплотнения следует учитывать зависимость изгибающего момента и конусности уплотнительного кольца от радиуса расположения спиральных канавок, которая оказывает значительное влияние на его работоспособность.

Дополнительно было проведено исследование влияния глубины спиральных канавок в диапазоне от 5-и до 9-и мкм (см. рис. 5б). В случае строгого плоскопараллельного зазора влияние глубины канавок (в рассматриваемом диапазоне) на величину изгибающего момента не велико.

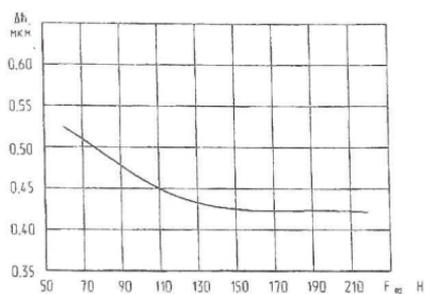
Но при допустимых значениях конусности (1 – 3 мкм) это влияние довольно ощутимо: разница между значениями моментов взятыми для значений глубин 9 и 5 мкм составила около 4 Нм. Кривые зависимостей изгибающего момента от величины деформации как бы поворачиваются вокруг одной точки при переходе от одной глубины канавки к другой. Подобные зависимости были получены для различного угла наклона спиральных канавок и для разного их числа (см. рис. 5в и 5г). Учитывать влияние радиуса расположения спиральных канавок, их глубины, числа и угла наклона возможно не только при проектировании уплотнения, но и в процессе его работы, когда все вышеперечисленные параметры могут изменяться за счет нанесения на дно спиральных канавок деформируемого покрытия. Под действием сил давления такое покрытие сжимается, изменяя размеры спиральных канавок и даже их число.

Тем самым при проектировании пары трения ТБКУ возможно подобрать такое сочетание различных геометрических параметров колец (например радиус расположения спиральных канавок, или их глубина), чтобы добиться необходимого характера зависимости изгибающего момента, действующего со стороны газового слоя, от величины деформаций при котором будет достигнута устойчивость уплотнения при изменении нагрузок, или в пределах производственных допусков.

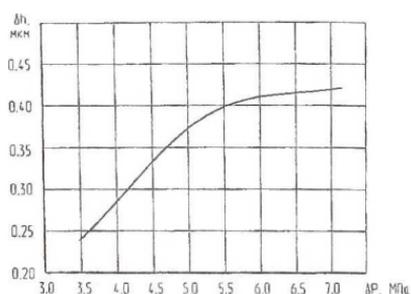
На переходных режимах в целях сохранения ресурса уплотнение нуждается в применении дополнительных средств регулирования, которые бы в условиях недостаточной газодинамической составляющей силы  $W_0$ , кратковременно увеличивали бы нагружающую силу. Классификация методов и средств регулирования была рассмотрена авторами в предыдущих публикациях. Однако, для того чтобы правильно выбрать средство регулирования для переходного режима необходимо оценить степень влияния на деформации уплотнительного кольца различных регулирующих воздействий.

В качестве такого воздействия может быть рассмотрено усилие пружины. При изменении режима (изменении частоты вращения) изменится газодинамическая составляющая давления в зазоре, что приведет (если уплотнение статически устойчиво) к увеличению деформации уплотнительного кольца. Уменьшить опасные деформации, которые могут привести к разрушению пары трения, можно изменяя (кратковременно увеличивая в данном случае) величину нагружающей силы. Этого можно добиться, если увеличить усилие пружины (см. рис. 6а). При изменении усилия пружины в диапазоне от 70 до 140 Н конусность уплотнительного кольца уменьшится на 0.1 мкм. Влияние усилия пружины на деформацию кольца во многом определяется соотношением между действующим перепадом давления и усилием пружины; в рассматриваемой конструкции перепад давления значительно превышал суммарное усилие пружин и

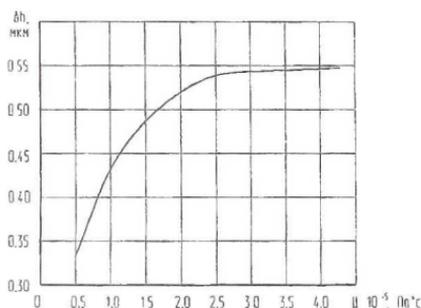
Поэтому влияние этого усилия на деформацию количественно не значительно.



а



б



в

Рисунок 6 - Зависимость величины деформации уплотнительного кольца от усилия пружины - а, действующего перепада давления - б, вязкости уплотняемой среды - в

В других конструкциях, как показывают расчетные исследования, это влияние может быть большим. Конструктивно такое регулирование можно реализовать, если использовать пружины, суммарное усилие которых будет меняться при переходе с режима на режим не линейно, а по требуемому закону, для чего достаточно установить пружины, имеющие разные значения жесткостей.

Осуществлять регулирование возможно также за счет выбора уровня деформаций уплотнительного кольца от величины параметров рабочего режима энергетической установки, в качестве которого может рассматриваться действующий перепад давления (рис. 6б). Это применимо к газотурбинным двигателям, которые имеют довольно длительные переходные режимы, каждый из которых характеризуется своей частотой вращения, а, следовательно, и различными значениями давлений воздуха или газа вдоль всего тракта.

В качестве еще одного примера регулирования может быть рассмотрено влияние вязкости уплотняемой среды на величину конусности уплотнительного кольца (см. рис. 6в). Известно, что вязкость значительно зависит от температуры. Проблема же тепловых деформаций является одной из самых важных при проектировании уплотнения. В зависимости от частоты вращения, в зазоре может вырабатываться тепловой поток, величина которого в рассматриваемой конструкции по экспериментальным данным составляет 100 – 150 Вт. Кроме того, в конструкции уплотнения возможно применение различного рода турбулизаторов, способствующих лучшему теплообмену между кольцами пары трения и уплотняемой средой. Все эти факторы влияют на вязкость уплотняемой среды, а следовательно и на деформацию уплотнительного кольца.

Приведенные результаты дают конструктору еще одну возможность для создания оптимальных с точки зрения регулирования, уплотнений и могут быть использованы при создании реальных конструкций.

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОРЦОВОГО БЕСКОНТАКТНОГО УПЛОТНЕНИЯ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЕ**

Проданов М.Е., Фалалеев С.В., Виноградов А.С., Еремин В.А.  
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Подобно процессу познания, процесс конструирования проходит этапы живого созерцания, абстрактного мышления и реализации на практике. Каждый из этих этапов одинаково важен. От того, как он осуществлен, во многом зависит качество готового изделия. Применительно к процессу создания сложного технического изделия эти этапы следует определять как этапы постановки задачи и анализа существующих конструкций, моделирования и производства. Для того чтобы минимизировать затраты, связанные с разработкой и внедрением нового изделия, все его составляющие должны быть четко согласованы друг с другом, стандартизованы в рамках одной интегрированной CAD/CAM системы. В качестве применения такого подхода к проектированию, был разработан алгоритм проектирования торцового бесконтактного уплотнения.

В современных условиях конкурентоспособность готового изделия во многом определяется затратами на процесс проектирования, длительностью этого процесса, удобством представления информации для производства и обмена. Во многом это достигается применением технологий параллельного проектирования, которые являются принципиально новым, интегрированным подходом к разработке сложных технических изделий. В основе такой технологии лежит идея совмещенного проекти-