

# РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ СО СТРУКТУРАМИ ОБРАТНОГО НАГНЕТАНИЯ

Фалалеев С.В., Виноградов А.С.,

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара  
Мюллер Н.К., Хаас В., Шефцик К.Р.,  
Университет, г. Штутгарт, Германия

Одним из главных параметров, определяющих совершенство авиационного двигателя или другой энергетической установки, является его величина КПД, которая, в свою очередь, в значительной степени определяется совершенством конструкций применяемых уплотнений. С другой стороны, торцовое уплотнение должно обладать значительной величиной ресурса.

Этим противоречивым требованиям удовлетворяют уплотнения, сочетающие газостатические и газодинамические эффекты, которые создаются с помощью специально спрофилированных камер на торцовой поверхности уплотнительного кольца. Такими камерами могут быть камеры Рэлея, спиральные канавки, микроклинья и т.д.. В книге [1] В.А. Марцинковским описано высокоэффективное торцовое уплотнение с импульсным уравниванием. Одно из колец имеет замкнутые камеры глубиной около 4 мм, а другое кольцо – пазы глубиной 2 мм. Благодаря тому, что сила, раскрывающая стык, зависит от взаимного положения структур, увеличиваясь при их совпадении и уменьшаясь с удалением друг от друга, в литературе уплотнения такого рода получили название импульсных. Периодические изменения давления могут повлечь за собой волновые процессы в системе, что может влиять на устойчивость работы всего уплотнения в целом. Так как рабочий зазор составлял значительную величину, то недостатком такого уплотнения являются высокие утечки рабочей среды. В последние годы в Штутгартском университете было создано малорасходное торцовое уплотнение со структурами обратного нагнетания глубиной несколько микрометров [2]. В данном уплотнении замкнутые камеры определенной формы, обеспечивающие обратное нагнетание утечек в уплотняемую полость, и подводящие каналы выполняются на одном кольце. В процессе сотрудничества ученых Штутгартского и Самарского государственного аэрокосмического университетов возникла идея объединить преимущества этих двух типов уплотнений и оценить работоспособность нового уплотнения при работе на жидкости и газе. Схема функционирования уплотнения описана ниже. Были проведены экспериментальные исследования на воде с измерением утечек и момента трения при различных перепадах давления рабочей среды, частоты вращения ротора и усилий пружин. Кроме того, были проведены успешные кратковременные испытания уплотнения на воздухе.

На рис. 1 приведена схема импульсного уплотнения со структурами обратного нагнетания 2, расположенными на невращающемся кольце, и подводящими структурами 1, выполненными на вращающемся кольце. Подводящие структуры 1 соединяются с полостью высокого давления и при вращении, в моменты сообщения структур 1 с замкнутыми структурами 2, в последних давление временно возрастает, превышая давление в уплотняемой полости.

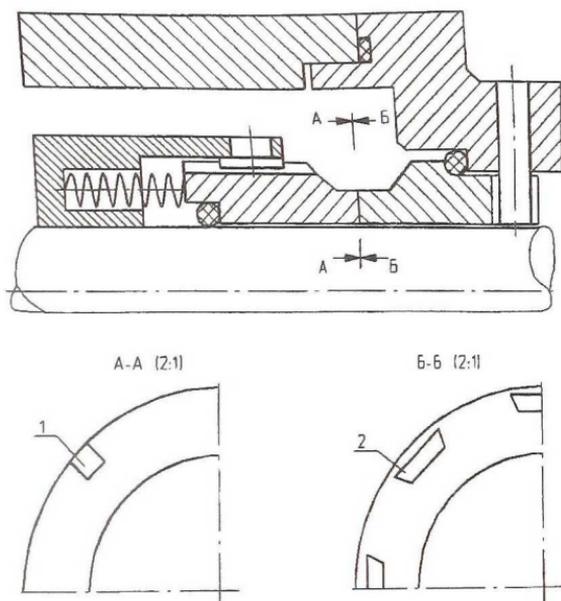


Рис. 1. Схема исследуемого уплотнения

Газ (или жидкость), попадающий в зазор, под действием образовавшегося перепада давления возвращается обратно. Таким образом, при работе в зазоре образуется пленка рабочего тела, обладающая достаточной жесткостью, чтобы предохранить поверхности от контакта. Саморегулирование торцового зазора обусловлено его зависимостью от величины зазора и частоты вращения ротора. Осредненное давление в возвращающей структуре тем больше, чем меньше торцовый зазор и чем больше частота вращения ротора. Увеличение зазора приводит к уменьшению осредненного давления в структурах и нарушению баланса сил, действующих на уплотнительное кольцо. В результате чего торцовый зазор уменьшается и осредненное давление возрастает до тех пор, пока не восстановится равновесие действующих сил. Когда ротор не вращается, давление сохраняется лишь в тех структурах, которые совпали с подводными каналами, раскрывающее усилие в этом случае мало, и уплотнение закрывается, выполняя тем самым функции стояночного уплотнения.

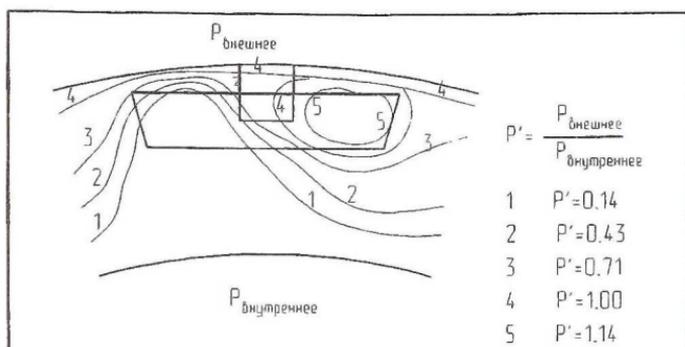


Рис. 2. Пример распределения давления для случая совпадения структур

В традиционных импульсных уплотнениях [1] вследствие значительной глубины камер давление по площади камеры практически не изменяется. В исследуемых же уплотнениях глубина камер сравнима с величиной зазора, поэтому это допущение не применимо. Для анализа изменения величины давления в структуре обратного нагнетания был проведен ряд расчетов с помощью программного комплекса «FIDAP». Пример распределения давления в зазоре в относительных величинах для случая совпадения структур показан на рис. 2.

Чтобы оценить надежность импульсного уплотнения, была проведена серия испытаний, в результате которой были получены экспериментальные зависимости величины момента трения при различных частотах вращения, перепадах давления и усилиях пружин. В экспериментальных условиях точно измерить действительную величину уплотнительного зазора затруднительно, поэтому его величина оценивалась косвенно, по величине момента трения. Приведенная зависимость (рис. 3) свидетельствует о том, что минимальный зазор сохраняется при всех значениях рабочих частот вращения; это означает, что уплотнение постоянно работает как бесконтактное. С увеличением усилия пружин происходит снижение величины зазора. Таким образом, анализируя полученные зависимости, можно выбрать то необходимое усилие, которое бы обеспечивало требуемую герметичность и устойчивость работы уплотнения. Не менее важной характеристикой является величина несущей способности, т.е. усилия, раскрывающего стык. Ее зависимости от величины зазора показаны на рис. 4. Несущая способность определялась исходя из того, что при работе уплотнение должно находиться в равновесии, т.е. сумма действующих внешних сил (сил давления и усилия пружин) равна несущей способности.

В результате проведенной работы было показано, что импульсное торцовое уплотнение со структурами обратного нагнетания в достаточной мере обладает герметичностью, устойчивостью и

надежностью, что делает его привлекательным для промышленного применения и дальнейших исследований.

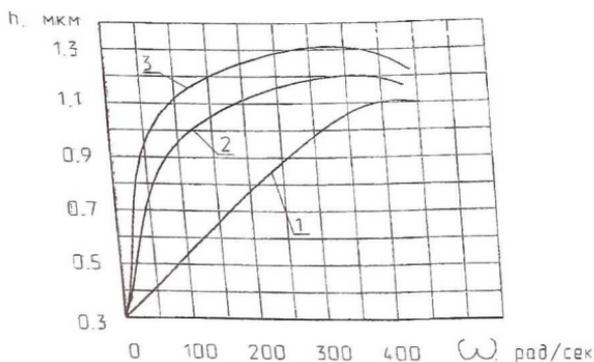


Рис. 3. Зависимость зазора от частоты вращения ротора при постоянном перепаде давления 0.5 МПа:

1 - при усилии пружин 1.0 МПа, 2 - 0.5 МПа, 3 - 0.2 МПа

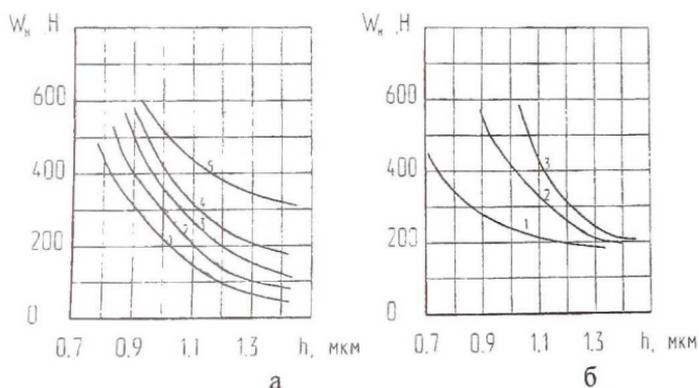


Рис. 4. Зависимость несущей способности от величины уплотняющего зазора: а - при постоянной частоте вращения 3000 об/мин и переменных перепадах давления (1 - 1.0 МПа, 2 - 0.5 МПа, 3 - 0.3 МПа, 4 - 0.2 МПа, 5 - 0.1 МПа), б - при постоянном перепаде давления 0.5 МПа и разных частотах вращения

(1 - 2000 об/мин, 2 - 3000 об/мин, 3 - 4000 об/мин)

#### Список литературы

1. Марцинковский В.А. Бесконтактные уплотнения роторных машин. - М.: Машиностроение, 1980. -200с.
2. Muller H.K., Nau B.S. Fluid Sealing Technology. -New York, USA: Marcel Dekker Inc, 1998. -485p.