

**МЕТОДИКА РАСЧЁТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТОРЦОВОГО УПЛОТНЕНИЯ С МИКРОКАНАВКАМИ
С УЧЁТОМ ДВУХФАЗНОСТИ**

©2018 С.В. Фалалеев, Е.Ф. Паровай

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

**CALCULATION TECHNIQUE FOR HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS
OF FACE SEALS WITH THE MICROGROOVES IN VIEW OF TWO-PHASE EFFECT**

Falaleev S.V., Parovay E.F. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

A numerical technique for calculating the hydrodynamic performance characteristics of face seals with micro-grooves is presented. The numerical technique is based on the finite volume method and takes into account the influence of inertia forces, the complex shape of seal gap and the phenomenon of vaporization in a working fluid of a face seal.

Торцовые гидродинамические уплотнения (ТГДУ) являются наиболее перспективным типом уплотнений в авиационной технике ввиду низких утечек и длительного ресурса. Во время работы ТГДУ в паре трения выделяется значительное количество теплоты, приводя к вскипанию и парообразованию в рабочем зазоре (при зазорах около 1 мкм до 10...20 мкм в криогенных и других легкокипящих средах). На возникновение и размер зоны парообразования влияют процессы трения, теплообмена, а также течение двухфазной среды. Активные тепловые процессы приводят к возникновению значительных градиентов температур в кольцах уплотнения, которые являются причиной их деформаций. Это приводит к искажению формы зазора, что в значительной мере сказывается на характеристиках уплотнения и его надёжности. Из-за сложности происходящих процессов деформацией рабочих поверхностей обычно пренебрегают, либо рассматривают упрощённо, не учитывая обратной связи между деформацией и размером зоны парообразования. Для снижения трения и повышения несущей способности на рабочую поверхность ТГДУ наносят микроканавки различной формы.

При проектировании гидродинамического уплотнения основной задачей является расчёт характеристик слоя смазки. Главную проблему при этом составляет определение поля распределения давления, т.к. необходимо учитывать сложную форму зазора (систему микроструктур, отклонения геометрии, деформации поверхностей) и фазовые переходы рабочего тела. Существующие методи-

ки расчёта сложны и не всегда имеют численные решения. Поэтому при расчёте характеристик ТГДУ приходится пренебрегать важными составляющими - деформациями, двухфазностью и т.д. Для решения данной проблемы была разработана методика на основе метода конечных объёмов. Весь объём торцового кольцевого зазора разбивается на одинаковые секторы по количеству микроканавок. Сектор представляет собой расчётную область, которая разбивается на элементарные соприкасающиеся объёмы.

Наличие микроканавок на рабочих поверхностях уплотнения вызывает возникновение чередующихся в окружном направлении зон (количество таких зон определяется количеством микроканавок) с высоким и отрицательным давлением. В результате в местах с отрицательным давлением наблюдается разрыв смазки с фазовым переходом рабочего тела из жидкого состояния в парообразное. При определении поля распределения давления в зазоре расчёт идет по уравнениям для жидкости для всей части зазора, исключая места разрыва смазки. В зонах парообразования расчёт ведётся по уравнениям для газа. Таким образом, с помощью метода итерации рассчитывается поле давления в слое смазки с учётом сложной формы зазора и фазовых переходов рабочего тела. Далее определяются остальные характеристики уплотнения (расход жидкости через уплотнение, мощность трения).

С помощью описанной методики были определены и проанализированы зависимости рабочих характеристик спроектированного ТГДУ опоры ротора агрегата подачи

топлива ГТД НК–361. Исследуемое ТГДУ представляет собой щель, образованную двумя кольцами, на одном из которых выполнены 6 равномерно расположенных по окружности микроканалов прямоугольной формы шириной $S=4$ мм; длиной $L=3$ мм; глубиной $h_k=3$ мкм. Наружный радиус составляет $R_2=27$ мм; внутренний радиус – $R_1=23$ мм; наружное давление $p_2=0,6$ МПа; внутреннее – $p_1=0,1$ МПа; частота вращения – $\omega=2000$ рад/с. Рабочее тело – сжиженный метан. Для моделирования работы уплотнения применён реальный цикл эквивалентно-циклических испытаний.

В результате проведения серии расчётов по разработанной методике были получены зависимости несущей способности, массового расхода и мощности трения в ТГДУ от частоты вращения, перепада давления, конусности, глубины и количества каналов и давления фазового перехода. Полученные зависимости характеристик ТГДУ от частоты вращения показаны на рис. 1.

Анализ вида зависимостей показал, что для высокоскоростных уплотнений желательно обеспечивать рабочий зазор 1...1,5 мкм, что позволяет добиться оптимума по утечкам и мощности трения при высокой подъёмной силе. При проектировании ТГДУ необходимо не допустить образования диффузорной щели (суммарными деформациями) при различных режимах работы, так как это может привести к значительному росту утечек жидкости и потере несущей способности. Добиться оптимальных гидродинамических характеристик ТГДУ можно варьированием количества и глубины каналов. Для конкретного примера при увеличении количества каналов с 4 до 8 несущая способность ТГДУ увеличивается в 2 раза. Максимальный гидродинамический эффект микроканалов достигается при достаточно малых значениях отношения глубины микроканавки к ширине зазора и далее снижается.

Утечки с увеличением глубины микроканалов также сначала возрастают, затем убывают вследствие изменения «всасывания», вызванного гидродинамическим эффектом, так как микроканавки работают как насос, нагнетая жидкость в зазор.

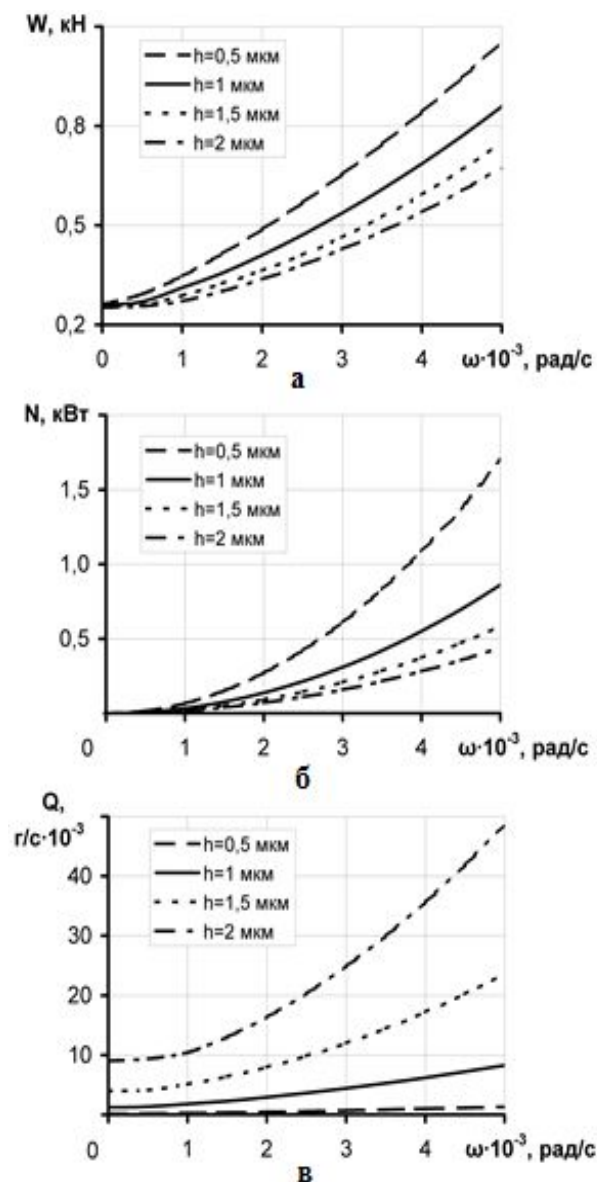


Рис. 1. Зависимости несущей способности (а), мощности трения (б) и массового расхода (в) от частоты вращения вала

Таким образом, при падении гидродинамической составляющей подъёмной силы происходит снижение массового расхода. Мощность трения незначительно снижается, что связано с локальным увеличением зазора в области микроканалов (из-за увеличения глубины микроканавки). При проектировании уплотнения для герметизации полостей с высоким перепадом давления параметры уплотнения надо выбирать таким образом, чтобы рабочий зазор обеспечивал оптимальные значения расхода и мощности трения при достаточной жёсткости слоя, то есть гидродинамической силе.