

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ПАЛЬЧИКОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Темис Ю.М., Селиванов А.В., Дзева И.Ю.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

### NUMERICAL INVESTIGATION OF A NON-CONTACTING FINGER SEAL

*Temis J.M., Selivanov A.V., Dzeva I.J. A non-contacting finger seal is a new high-efficient seal technology developed for air-to-air sealing in gas turbine engines. The finger seal is comprised of a stack of plates with special cuts. These cuts form the fingers which can flex under gas forces as cantilever beams. Investigation multi-fields method is developed for estimation of finger seal performance. This method is comprised gas flow simulation and stress-deformed analysis. Mathematical models have different level of refinement and can be used both for fast optimizations and full analysis of the finger seal.*

Тенденции развития уплотнительной техники подразумевают постепенный переход от «жестких» конструкций к уплотнениям с гибкими элементами, которые могут реагировать на изменение рабочих условий и обеспечивают высокую степень герметизации зазора на протяжении всего полетного цикла. При изменении радиальных размеров ротора, вследствие тепловых и инерционных нагрузок, гибкие элементы уплотнения должны отклоняться под действием газовых нагрузок, сохраняя гарантированно малый зазор над ротором.

В настоящее время прорабатываются три концепции «гибких» бесконтактных уплотнений: пальчиковые, пластинчатые и фольговые. Они различаются формой гибких элементов, но используют одинаковый принцип работы, основанный на аэродинамической балансировке подвижных деталей уплотнения в потоке газа.

Типовое пальчиковое уплотнение представляет собой сборку из нескольких тонких кольцевых пластин с прорезями определенной формы (рис. 1). Прорези формируют равномерно распределенные по окружности гибкие полоски – пальчики, которые могут деформироваться под действием газовых сил. На пальчиках, расположенных со стороны области низкого давления, выполнены площадки, создающие подъемную силу.

Балансировка пальчиков основана на возникновении в канале под площадками

газодинамических (индуцированных вращением ротора) и газостатических (определяемых осевым перепадом давления) подъемных сил, которые уравнивают силы реакции и силы внешнего давления. В результате обеспечивается бесконтактный режим работы уплотнения.

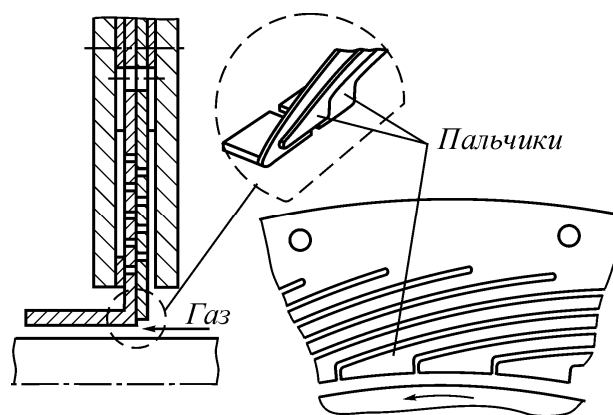


Рис. 1. Пальчиковое уплотнение

При проектировании пальчиковых уплотнений целесообразно использовать методы многодисциплинарного математического моделирования и оптимизации. На первом этапе на основе полной термомеханической модели узла двигателя должна определяться кинетика перемещений в системе ротор-корпус уплотнения. После чего варьированием формы пальчиков подбирается их жесткость, необходимая для поддержания гарантированно малой величины радиального зазора в уплотнении. При этом задача расче-

та НДС и перемещений пальчиков должна решаться совместно с задачей расчета течения газа в уплотнении для определения действующих аэродинамических усилий. Решению этой совместной задачи уделено основное внимание в представленной работе.

Для моделирования течения газа под пальчиками была разработана конечно-элементная модель на основе двумерного уравнения Рейнольдса. В этой модели учитывалось изменение параметров газа по осевой и окружной координатам, что позволило учесть эффекты, определяющие возникновение газодинамических и газостатических подъемных сил.

Расчет деформаций пальцев был проведен на основе «балочной» модели. В первом приближении считалось, что площадка совершает перемещения и повороты как жесткое (недеформируемое) тело в результате перемещений и поворотов сечения  $F$ , в котором она крепится к ножке пальчика. К этому же сечению приводилось нагружение от газового слоя под площадкой. Ножка моделировалась криволинейной консольной балкой, заделанной у основания. Для повышения точности в модели учтено действие осевого перепада давления на пальчики, их контактное взаимодействие и введено понятие эффективной длины ножки. Для вычисления перемещений и углов поворота использовался интеграл Мора.

Разработанные модели были верифицированы при помощи коммерческих вычислительных комплексов. Погрешность по интегральным показателям при этом была ниже 5%, что позволило сделать вывод о допустимости использования упрощенных моделей для анализа характеристик пальчикового уплотнения.

На основе этих моделей проведено расчетное исследование статических характеристик пальчикового уплотнения задней опоры КНД. Показано, что перемещения пальчиков с гладкой подъемной площадкой определяются перепадом давления и слабо зависят от угловой скорости ротора; при этом наблюдается подкрутка площадки относительно поверхности ротора (рис. 2).

Также были проработаны варианты наклонной подъемной площадки и площадки с кольцевой канавкой на внутренней поверхности, что позволило значительно изменить величину подъемной силы за счет перераспределения давления газа.

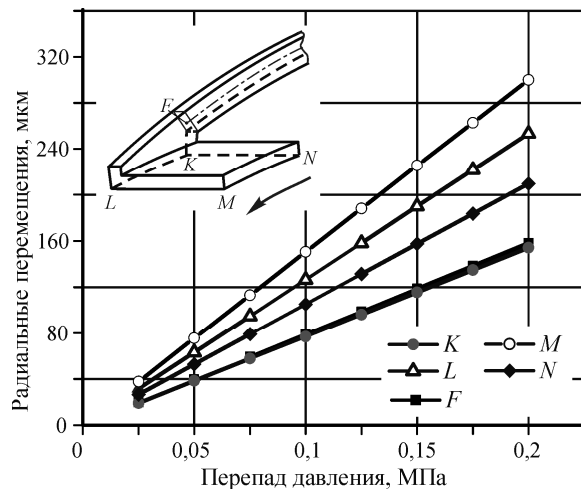


Рис. 2. Радиальные перемещения площадки

Необходимо отметить, что наличие гибких пальчиков делает актуальным вопрос обеспечения аэроупругой устойчивости уплотнения, так как возбуждение автоколебательных режимов может привести к его быстрому разрушению. Поэтому была проведена предварительная оценка устойчивости работы уплотнительного узла, как системы с двумя степенями свободы. Жесткостные и демпфирующие характеристики газового слоя при этом определялись из решения нестационарной задачи течения газа в каналах под площадками.

Результаты проведенных исследований подтвердили высокую эффективность пальчиковых уплотнений (малая величина утечки газа). При этом у конструктора есть широкие возможности для настройки уплотнения на требуемый уровень перемещений как за счет управления жесткостью пальчиков (путем изменения их формы), так и посредством профилирования канала под подъемными площадками для изменения действующих аэродинамических усилий.