

УДК 629.78

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫМИ ЗАЗОРАМИ ТВД ПЕРСПЕКТИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

© Григорьев Е.М., Бадыков Р.Р., Фалалеев С.В.

*Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

e-mail: grigory1287@gmail.com

Уменьшение радиального зазора между статором и лопатками ротора в компрессоре высокого давления (КВД) и турбине высокого давления (ТВД) может обеспечить значительное снижение удельного расхода топлива (УРТ), повышение общего срока эксплуатации, запаса компрессора по помпажу и общего КПД двигателя, а также увеличение максимальной тяги и дальности полета. Затраты на техническое обслуживание крупных коммерческих газотурбинных двигателей часто превышают 80 миллионов рублей. Вывод двигателя из эксплуатации в первую очередь связан с запасом по температуре выхлопных газов (ТВГ), вызванным в основном износом компонентов ТВД. Увеличенный радиальный зазор является основным фактором разрушения нагретых деталей. Поскольку тенденция развития двигателестроения движется в сторону увеличения мощности и уменьшения количества деталей, а рынок побуждает производителей увеличивать срок службы, потребность в уменьшении радиального зазора продолжает расти. Ведутся дискуссии по поводу природы ухудшения характеристик ТВД авиационного газотурбинного двигателя и механизмов, которые способствуют им. Выявлены преимущества ТВД за счет улучшенного управления зазорами. Представлены устаревшие и современные технологии управления радиальными зазорами вместе со спецификациями для систем контроля зазора двигателя следующего поколения [1].

Динамика ротора обычно не играет большой роли в изменениях радиального зазора в ТВД. Зазоры в подшипниках, их расположение и конструкция вала сводят к минимальному прогибу вала, а рабочие скорости значительно ниже критических для ротора. Производственные допуски как на длину лопаток, так и на цилиндричность корпуса также мало влияют на вариации зазора в ТВД. Динамика (зазоры подшипников) и производственные допуски (т. е. округлость бандажа, изменение длины лопатки) обычно добавляют менее 0,04 мм к изменению радиального зазора. Несмотря на то что наблюдается значительный осевой рост из-за тепловой нагрузки ротора, он не влияет на изменение зазора. Этот эффект намного больше в секциях конической формы, таких как турбина низкого давления (ТНД) [1].

На рис. 1 показано расположение радиального уплотнения рабочей лопатки высокого давления в современном газотурбинном двигателе. На рисунке показано поперечное сечение камеры сгорания и двухступенчатого ТВД. Отмечены диск турбины, лопатка и торцевое уплотнение турбины первой ступени. Наружные воздушные уплотнения образуют внутреннюю часть стационарного корпуса, образуя кожух вокруг вращающихся лопаток, ограничивая газ, попадающий на кромки. Радиальный зазор рабочей лопатки, как упоминалось ранее, изменяется в зависимости от режимов работы двигателя. Механизмы, лежащие в основе этих изменений зазора, происходят из-за смещения или деформации как неподвижных, так и вращающихся деталей двигателя из-за ряда нагрузок на эти компоненты. Нагрузки можно разделить на две категории, а именно: нагрузки от двигателя (силовые) и полетные нагрузки.

Нагрузки двигателя включают центробежные, тепловые, внутренние и осевые. Полетные нагрузки включают инерционные (гравитационные), аэродинамические (внешнее давление) и гироскопические. Нагрузки двигателя могут вызывать как осесимметричные, так и асимметричные изменения зазора (см. рис. 2 и 3). Полетные нагрузки вызывают асимметричные изменения зазора.

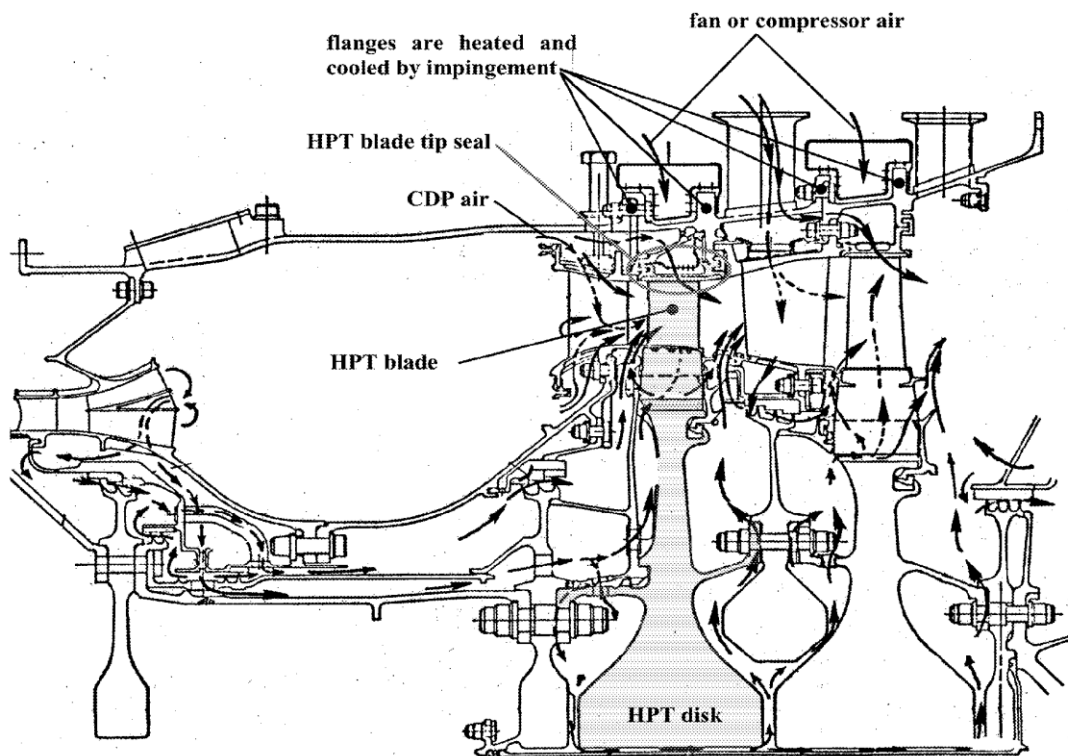


Рис. 1. Расположение уплотнения лопаток ТВД в современных газотурбинных двигателях

Осесимметричные изменения зазора происходят из-за равномерной нагрузки (центробежной, тепловой, внутреннего давления) на неподвижные или вращающиеся конструкции, которые создают равномерное радиальное смещение, как показано на рис. 2. Центробежные и тепловые нагрузки являются причиной самых больших радиальных изменений зазора.

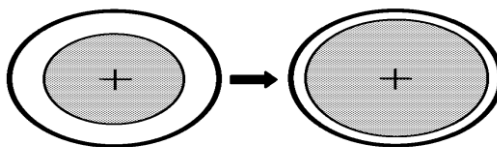


Рис. 2. Осесимметричное изменение зазора

Асимметричные изменения зазора происходят из-за неоднородной нагрузки (тепловой, осевой, инерционной и аэродинамической), как правило, на неподвижные конструкции, которые создают неравномерное радиальное смещение, как показано на рис. 3. Деформация корпуса из-за неравномерного нагрева может вызвать кожух для открытия зазоров вдоль участка или участков окружности, уменьшая их на других участках (например, овализация). Асимметричная деформация корпуса также возникает из-за аэродинамических, тяговых и маневровых нагрузок. Поскольку двигатели не устанавливаются на самолет по их осевым линиям, реакции

аэродинамической нагрузки и осевой нагрузки создают приложенный момент к корпусу, который вызывает изгиб конструкции относительно ротора.

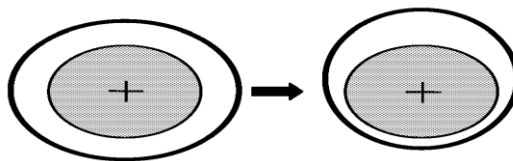


Рис. 3. Асимметричное изменение зазора

Аэродинамические нагрузки на впускной кожух создают поперечные силы и изгибающие моменты на корпусе вентилятора, которые могут проходить через двигатель, отклоняя корпуса. Эти нагрузки создаются из-за изгиба воздушного потока, входящего во входное отверстие вентилятора, и, таким образом, зависят от воздушного потока вентилятора, угла атаки входного отверстия и скорости самолета. Аэродинамические нагрузки максимальны сразу после взлета, когда угол атаки на входе наиболее экстремален. Аэродинамические нагрузки во время взлета обычно действуют так, чтобы исказить корпус, так что закрытие происходит около нижней центральной части двигателя (то есть в положении «шесть часов»). Осевые нагрузки также способствуют деформации корпуса – явлению, известному как изгиб каркаса. Во время взлета осевые нагрузки создают нисходящий тангажный момент, заставляющий зазоры открываться по направлению к верхней части двигателя при закрытии снизу [2; 3]. Обратное верно во время реверсивной тяги, когда теперь момент тангажа увеличивается, зазоры закрываются вверху и открываются внизу.

### Библиографический список

1. Scott B. Lattime Turbine Engine Clearance Control Systems: Current Practices and Future Directions. M. Steinetz. 2002.
2. Blaney Ken F. Active clearance control system with zone controls / Lutjen Paul M. 2014.
3. Daniel David Snook Clearance control system for a gas turbine, corresponding gas turbine, and method for controlling clearances. 2012.