

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРЦОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ

© 2011 С.В.Фалалеев¹, В.Б.Балякин¹, Д.К.Новиков¹, В.В.Седов², И.С.Виноградов³

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²ОАО «Газпром», Москва

³ООО «Газпром трансгаз Самара»

Поступила в редакцию 24.02.2011

В данной статье рассмотрена математическая модель торцового газодинамического уплотнения, экспериментально исследовано его динамическое состояние.

Ключевые слова: математическая модель, торцовое газодинамическое уплотнение, динамическое состояние.

Значительная часть повреждений в уплотнениях происходит в результате возникновения в них опасной вибрации. Поэтому необходимо исследование динамики торцовых газодинамических уплотнений (ТГДУ) с целью выявления их эксплуатационных ограничений. К настоящему времени в ОАО «Газпром» накоплен большой опыт эксплуатации нагнетателей с электромагнитными подшипниками. Преимущества электромагнитных подшипников делают их пригодными для широкого применения как в малых машинах с массой ротора менее килограмма, так и в тяжелых машинах и механизмах с массой ротора несколько тонн. Существенное влияние на величину допускаемой вибрации ротора в электромагнитных подшипниках имеют динамические свойства торцовых газодинамических уплотнений. Анализ опыта эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с электромагнитными подшипниками показывает, что необходимо провести исследование динамики ТГДУ при амплитудах вибрации ротора до 250...300 мкм с частотой 15...200 Гц. При этом целесообразно проведение как натуральных экспериментов, так и

Фалалеев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов. E-mail: kipdla@ssau.ru

Балякин Валерий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой основ конструирования машин. E-mail: okm@ssau.ru

Новиков Дмитрий Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов. E-mail: kipdla@ssau.ru

Седов Виктор Викторович, начальник отдела по капитальному ремонту и диагностике КС, ДКС, КС ПХГ и СОГ Управления по транспортировке газа и газового конденсата. E-mail: V.Sedov@adm.gazprom.ru

Виноградов Илья Сергеевич, главный инженер ПТП. E-mail: I.Vinogradov@samaratransgaz.gazprom.ru

численных, с использованием современных программных средств.

В настоящее время используется несколько динамических моделей ТГДУ [1]. Анализ существующих и перспективных конструкций ТГДУ показал, что наиболее корректной является динамическая модель, представленная на рис. 1. Она состоит из 3-х масс. Прижим ($M_{пр}$) установлен в корпусе турбомшины и поджимается к невращающемуся кольцу (M_k) набором пружин жесткостью $C_{юз}$. Вторичное уплотнение, установленное между невращающимся кольцом и прижимом, представляется элементом, обладающим жесткостью (C_1), демпфированием (b_1) и сухим трением (R_1). Между невращающимся кольцом (M_k) и вращающейся втулкой ($M_{вт}$) находится безынерционная упруго-вязкая подвеска (рабочий слой, $C_{дин}$). Между вращающейся втулкой ($M_{вт}$) и торцом ротора находится вторичное уплотнение, которое представляется элементом, обладающим жесткостью (C_0), демпфированием (b_0) и сухим трением (R_0). К ротору втулка прижимается в осевом направлении неуравновешенной силой F_0 и имеет ограничитель перемещений в виде зазора δ . На вал втулка монтируется либо на гофрированный демпфер, либо на резиновое кольцо. Взаимное осевое перемещение в этом элементе моделируется сухим трением (R_2). Торцы ротора передает воздействие на ТГДУ, имеющее осевую и угловую составляющие колебаний с амплитудами z_0 и α_0 . Втулка и кольцо могут дополнительно иметь изгибные составляющие колебаний θ . Изгибные колебания кольца будут компенсироваться упругими деформациями вторичного уплотнения, поэтому на прижим они передаваться не будут.

Создание аналитической методики расчёта для данной динамической модели ТГДУ затруднительно. В работе [1] приведен пример преоб-

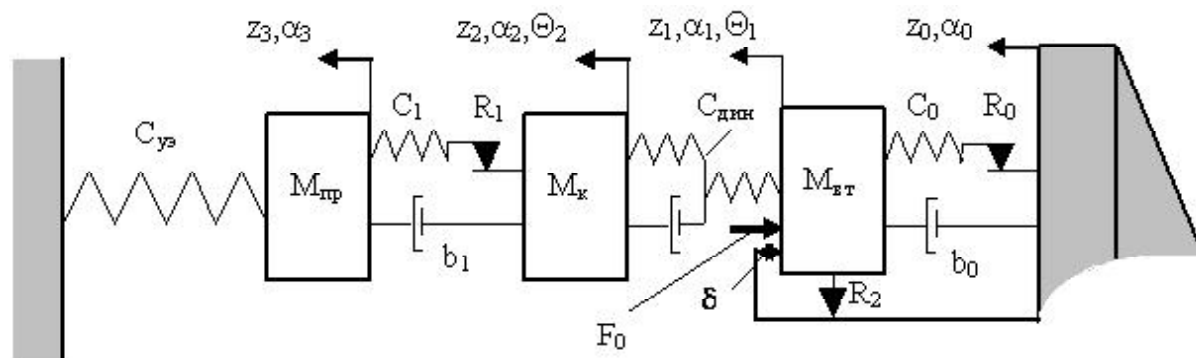


Рис. 1. Трёхмассовая динамическая модель ТГДУ

разования данной модели в двухмассовую модель при учёте ряда допущений и предложен аналитический метод расчёта. Анализ трёхмассовой динамической модели проведем с помощью виртуального стенда, созданного с использованием программного комплекса кинематического и динамического анализа ADAMS. В этом случае можно моделировать сложное динамическое нагружение со стороны ротора.

Для расчета динамических характеристик ТГДУ необходимо определить их статические характеристики. Теоретические основы течения газа в ТГДУ заложены в работе Мюдермана [2], в которой рассмотрены влияние сжимаемости газа, количества и геометрии спиральных каналов, режимов течения газа. В работе [3] модифицирована математическая модель ТГДУ за счет учёта деформаций уплотнительных колец от силовых и тепловых факторов. В ней представлены инженерные методики расчёта реальных величин и форм зазора, распределения давления в щели уплотнения, утечек, коэффициентов жёсткости и демпфирования в газовом слое и элементах ТГДУ. Использование данных методик позволяет с достаточной точностью моделировать динамические характеристики ТГДУ.

Вначале на виртуальном стенде моделировались только осевые колебания торца ротора. Результаты численного эксперимента с достаточной точностью совпали с аналитическими результатами, приведенными в работе [1]. Наличие осевых воздействий ротора с амплитудами величиной 100...300 мкм и частотой 100 Гц не оказывает сильного влияния на работу ТГДУ. Однако при росте частоты колебаний до 200 Гц при амплитуде 200 мкм минимальная величина зазора снижается до 1 мкм, а при амплитуде 300 мкм – до 0,3 мкм. Как показывает опыт, при таких зазорах уже возможны касания уплотнительных поверхностей. Да и утечки возрастают в 2...3 раза, что может вывести их за разрешённый диапазон.

Далее имитировалось вращение ротора вала с торцовым биением. В этом случае на ТГДУ действуют перемещающиеся в окружном направле-

нии как осевое, так и угловое воздействия ротора (колебания типа «бегущая волна»). Проведенные расчёты колебаний ТГДУ показали, что при осевой амплитуде $Z_0=0,3$ мм и угловой амплитуде $\beta_0=0,003$ рад при частоте возбуждения 100 Гц отклонение величины зазора от номинального положения составляет от 0,25 до 1,5 мкм. А при частоте 200 Гц происходит соударение уплотнительных поверхностей. При снижении значений Z_0 и β_0 в два раза при частоте возбуждения 200 Гц соударения уплотнительных поверхностей не произойдет. Минимальная величина зазора снижается до 0,8 мкм, что является допустимым.

Для оценки работоспособности ТГДУ при повышенных амплитудах колебаний ротора была проведена серия натуральных экспериментов на динамическом стенде [4]. Консольно к валу экспериментальной установки, установленному на двух подшипниках в корпусе, крепится втулка ротора, на которой смонтировано ТГДУ. Технологически реализуемо как радиальное смещение втулки, так и ее перекося. В качестве определяющих параметров при экспериментах были выбраны радиальное и торцевое биение роторной втулки.

При нерасчётной работе магнитного подвеса происходят радиальные колебания ротора относительно статора с амплитудой от 0,1 мм до 0,3 мм. Для имитации этого процесса на стенде соответствующее радиальное биение (0,1; 0,2; 0,3 мм) роторной втулки ТГДУ задавалось смещением оси втулки относительно оси вращения.

Комбинация радиального и осевого биений достигалась за счёт перекося роторной втулки.

Радиальное биение вала при монтаже контролируется в районе второй ступени уплотнения, а осевое биение замеряется на торцевой поверхности роторной втулки уплотнения. В процессе работы за счёт действия динамических сил происходит увеличение амплитуды колебаний вала.

Схема системы измерения представлена на рис. 2. Измерение динамического радиального биения вала под второй ступенью уплотнения в горизонтальной и вертикальной плоскости производились токовихревыми датчиками с точно-

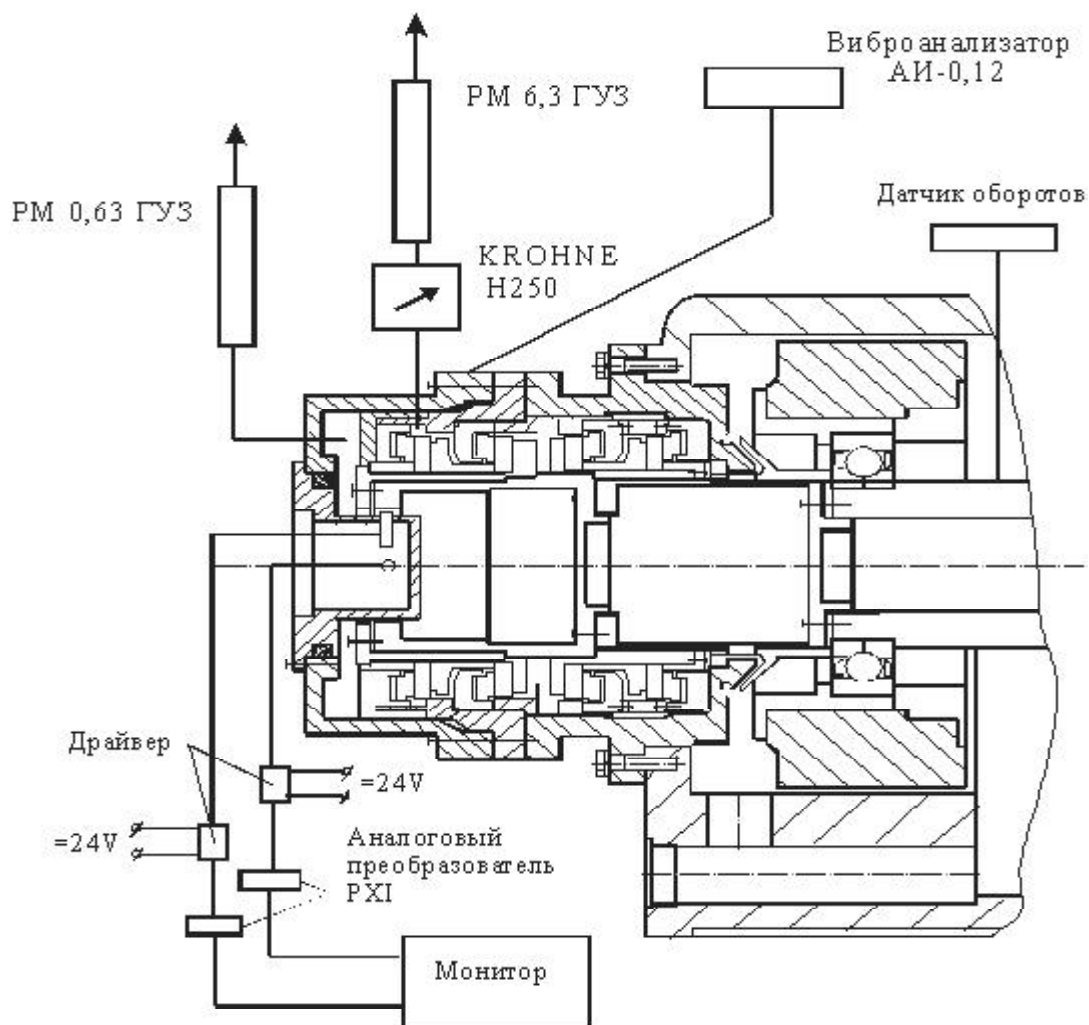


Рис. 2. Схема системы измерений при динамических испытаниях

стью 1 мкм, которое можно пересчитать в динамическое радиальное и торцовое биение первой ступени ТГДУ за счёт наличия жёсткой кинематической связи. Результаты измерений фиксировались и обрабатывались блоком РХІ производства фирмы «National Instruments» [5].

В процессе экспериментальных исследований получено следующее. Радиальное смещение вала с эксцентриситетом $e = 0,1, 0,2$ и $0,3$ мм (без перекоса вала) практически не влияет на работу ТГДУ при частоте 90 Гц. При наличии перекоса вала утечки воздуха через ТГДУ растут. В процессе проведения серии экспериментов были выявлены предельные амплитуды колебаний вала. После работы ТГДУ с перекосом вала (радиальное смещение вала составило 0,3 мм, а торцовое биение втулки вала – 0,25 мм) на рабочем режиме (частота возбуждения вала 90 Гц) были обнаружены фрагменты изнашивания графита на наружном диаметре уплотнительного кольца. При повторном запуске на этом режиме произошёл аварийный останов стенда из-за возникновения значительных угловых колебаний деталей ТГДУ. Вначале утечки воздуха достигли предельных

значений (90 нормолитров в минуту), а затем произошло заклинивание графитового кольца из-за того, что резиновое уплотнительное кольцо (вторичное уплотнение) попало в возникший зазор между графитовым кольцом и блоком уплотнения, и оно не смогло отслеживать колебания твёрдосплавного кольца.

Таким образом, проведенные исследования динамики ТГДУ показывают, что уплотнение удовлетворительно работает при осевых либо при радиальных амплитудах вибрации ротора до 250...300 мкм с частотой до 100 Гц. Наличие вибрации с частотой 200 Гц, особенно при наличии одновременно осевых и угловых колебаний, делает ТГДУ неработоспособным, либо требует ограничения амплитуды колебаний. На основании проведенных численных и натурных экспериментов рекомендуется для ТГДУ предельное значение амплитуд радиальных колебаний принять равным 0,3 мм, а осевых – 0,2 мм при частоте до 100 Гц. При частоте 200 Гц рекомендуется половина этих значений. Опыт ООО «Газпром трансгаз Самара» показал, что обеспечение в эксплуатации амплитуд осевых и радиальных ко-

лебаний ротора величиной не более 50 мкм при допустимости на переходных режимах кратковременных повышений до 100...130 мкм не приводит к нарушению работы ТГДУ [4]. Это качественно подтверждает достоверность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фалалеев С.В., Седов В.В. Динамические характеристики торцового газодинамического уплотнения в ГПА с магнитным подвесом // Газотурбинные технологии. 2009. №3. С.34-37.
2. *Muijderman E.A.* Spiral groove bearings. Springer-Verlag, 1966. 199p.
3. Фалалеев С.В., Чегодаев Д.Е. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: Основы теории и проектирования. М.: Изд-во МАИ, 1998. 276 с.
4. Медведев С.Д., Фалалеев С.В., Новиков Д.К., Балякин В.Б. Повышение эксплуатационной надёжности ГПА развитием конвертированных авиационных технологий. Самара: СамНЦ РАН, 2008. 371с.
5. Лёжин Д.С., Фалалеев С.В. Разработка автоматизированной системы управления динамическим стендом / Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции. Самара, 2009. Ч.1. С.38-39.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE FACE GAS DYNAMIC SEAL

© 2011 S.V. Falaleev¹, V.B. Balyakin¹, D.K. Novikov¹, V.V. Sedov², A.S. Vinogradov¹, I.S. Vinogradov³

¹ Samara State Aerospace University
² Joint stock company "GAZPROM", Moscow
³ "Gazprom transgas Samara"

In this article we described mathematic model of the face gas dynamic seal and made experimentally an analysis of its dynamic.

Key words: mathematic model, face gas dynamic seal, dynamic.

Sergey Falaleev, Doctor of Technics, Professor, Head of Aircraft Engines Design Department . E-mail: kipdla@ssau.ru
Valery Balyakin, Doctor of Technics, Professor, Head of Maschinen Design Department . E-mail: okm@ssau.ru
Dmitry Novikov, Doctor of Technics, Professor of Aircraft Engines Design Department . E-mail: kipdla@ssau.ru
Viktor Sedov, Chief of division on Capital Repair and Diagnostic of Compressor Stations Subdepartment, Gas and Gas Condensate Transportation Department.
E-mail: V.Sedov@adm.gazprom.ru
Vinogradov Ilya Sergeevich, Head of technical department, PTP. E-mail: I.Vinogradov@samaratransgaz.gazprom.ru