

Т. В. Максимов, В. А. Максимов, А. Г. Егоров

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ТУРБОКОМПРЕССОРАХ ПОДШИПНИКОВ С ГАЗОВОЙ СМАЗКОЙ

Ключевые слова: турбокомпрессор, газовая смазка, подшипник скольжения.

Излагаются преимущества и недостатки газовой смазки, приводятся примеры конструкций турбоагрегатов с такими подшипниками.

Keywords: turbocompressor, gas lubrication, plain bearing.

Advantages and limitations of gas lubrication have been shown, specific examples of turbounits design equipped with bearing of this type have been presented.

Развитие современного турбомашиностроения связано с ростом скорости вращения роторов, так как это приводит к повышению производительности машин, уменьшению их габаритов, массы. Но при этом растёт виброактивность машин. Снижение виброактивности, повышение надёжности машин эффективно достигается применением подшипников с газовой смазкой. При этом устраняется масляная система, снижается пожароопасность и возможность загрязнения окружающей среды. По оценкам исследователей, до 1/3 мировых энергетических ресурсов расходуется на преодоление трения в той или иной форме. Подшипники с газовой смазкой позволяют минимизировать потери на трение, так как вязкость газов примерно в тысячу раз меньше вязкости масел.

Турбомашины с подшипниками на газовой смазке выпускаются серийно в различных отраслях техники, в первую очередь, в авиакосмической, станкостроительной. По результатам эксплуатации технический ресурс подшипников с газовой смазкой достигает 100 тысяч часов работы. Однако, несмотря на очевидные достоинства опор с газовой смазкой, распространение их в энергетическом машиностроении осуществляется относительно медленно из-за специфики конструкции и технологических процессов изготовления, недостаточного уровня знаний в области проектирования, изготовления и эксплуатации опор с газовой смазкой. Использование турбомашин с подшипниками на газовой смазке в специальных энергетических установках, в бортовом оборудовании самолетов, космических аппаратов, кораблей и др. обусловило конфиденциальный характер исследований и опытно-конструкторских работ. Лишь немногие из полученных результатов описаны в технической литературе.

На основании опубликованных работ инженеру весьма сложно спроектировать подшипники с газовой смазкой с необходимыми характеристиками для реальной машины. Большое количество работ, выполненных на достаточно высоком научном уровне, посвящено отдельным вопросам газовой смазки и не охватывают всех аспектов, связанных с созданием турбомашин с подшипниками на газовой смазке. В работах,

посвящённых газовой смазке, недостаточно рекомендаций по проектированию подшипников для турбомашин, математические выкладки во многих случаях не доведены до конкретных результатов и не проверены экспериментально. К тому же недостаточно работ, посвящённых численным методам расчёта подшипников с газовой смазкой, которые в связи с повсеместным распространением компьютеров и увеличением скорости счета становятся наиболее перспективными и удобными для пользователей. В то же время программы расчёта характеристик подшипников с газовой смазкой, доведённые до конкретных числовых результатов, становятся "товаром" и воспользоваться ими сложно.

Кроме многих достоинств, подшипники с газовой смазкой имеют и недостатки, а именно низкую несущую способность и отсутствие граничной смазочной плёнки, что обуславливает высокие требования к выбору материалов пар трения. Однако, многолетний опыт исследований подшипников с газовой смазкой в КНИТУ (КХТИ) показывает, что несущая способность подшипников с газовой смазкой достаточна для многих высокооборотных турбомашин, в том числе и турбокомпрессоров. Успешное применение газостатодинамических уплотнений с профилированными контактными поверхностями колец (со спиральными канавками и др.) в центробежных нагнетателях газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и др. доказывает это.

Однако для получения необходимых характеристик весьма важно уметь точно рассчитывать и конструировать подшипники с газовой смазкой.

В работах [1, 2] сделана попытка обобщить опыт проектирования газовых подшипников ведущих зарубежных фирм и отечественных организаций, а также известных исследователей (Коровчинского М. В. с соавторами, Шишкина И. П., Самсонова А. И., Лучина Г. А., Поспелова Г. А. с соавторами, и многих других). Дело в том, что известные монографии в данной области изданы сравнительно давно, стали библиографической редкостью и известны лишь узкому кругу специалистов.

На возможность применения газов и, в частности, воздуха в качестве смазочной среды в

подшипниках впервые, по-видимому, было указано около ста пятидесяти лет тому назад А. Хирном (1854г.), но только через сорок три года были опубликованы первые результаты экспериментов (А. Кингсбери, 1897г.) с подшипниками, смазываемыми воздухом, а еще через пятьдесят три года в 1950г. С. А. Шейнбергом были сконструированы и испытаны образцы пяти подшипников, смазываемых воздухом, которые могли иметь техническое применение [2]. Одновременно с этим С. И. Шейнберг предложил также соответствующую теорию смазки цилиндрических газодинамических подшипников, продолжив соответствующие теоретические исследования Гаррисона (1913г.).

В последующие годы подшипники, работающие на газовой смазке, не выходили из стадии эпизодического экспериментирования, а теория не ушла сколько-нибудь заметно от работ С. А. Шейнберга, так что подшипники на газовой смазке рассматривали скорее как технические курьёзы, чем как проблему, которая может дать какие-либо удачные технические решения.

Однако в период с 1955 по 1959 годы обнаружили преимущества газовых опор в машинах, применяемых в ядерной технике и в некоторых станках для доводочных операций, и в 1959 году в Вашингтоне был созван Первый международный симпозиум по газовой смазке. Хотя большинство докладов на этом симпозиуме носило теоретический характер, но результаты экспериментов в этой области показали, что подшипники с газовой смазкой могут найти почти столь же широкое применение в технике, начиная с пищевой и текстильной, до приборной и турбомашиностроительной отраслей, как и подшипники на жидкой смазке. Поэтому не удивительно, что в течение девяти лет после 1959 года начался период широкого внедрения газовых опор скольжения в технику, итоги которого были подведены на II международном симпозиуме по газовой смазке, проходившем в г. Лас-Вегас (штат Невада) с 11 по 27 июня 1968г.

Столь интенсивный прогресс в применении опор скольжения на газовой смазке объясняется тем, что применение газа, и в частности, воздуха как смазочной среды снимает многие ограничения, связанные с температурой, ущербом, наносимым радиацией, высокими скоростями (до 700 тыс. об/мин), загрязнением окружающей подшипник среды и т.д., которые в настоящее время существуют при применении иных смазывающих систем. При этом необходимо также подчеркнуть, что основным фактором, способствовавшим успешному конструированию опор различного назначения, явилась глубокая и обширная теоретическая разработка соответствующих вопросов.

В настоящее время применяются три типа опор с газовой смазкой: газодинамические; подвесы или газостатические опоры с внешним наддувом; гибридные или газостатодинамические. В газодинамических опорах несущая способность смазочного слоя возникает лишь благодаря вязкости газа при движении одной из поверхностей, обра-

зующих пару трения с сужающейся формой зазора в направлении скольжения. Поэтому их несущая способность невелика (средняя удельная нагрузка на опору не превосходит $1,0 \text{ кг/см}^2$).

Газодинамические опоры подразделяются на:

- а) радиальные подшипники с гладкими поверхностями вала и вкладыша;
- б) радиальные подшипники с канавками вдоль образующих;
- в) радиальные подшипники с косыми и шевронными канавками;
- г) радиальные подшипники, поверхность которых образована небольшими ступенчатыми секторами;
- д) подпятники или упорные подшипники гладкие и со спиральными или шевронными канавками;
- е) опоры цапф, состоящие из нескольких секторных самоустанавливающихся подушек (вкладышей);
- ж) ленточные и лепестковые подшипники.

Гибридные опоры и подвесы (удельная несущая способность которых доходит до 8 кг/см^2) не имеют такого конструктивного многообразия как аэродинамические опоры и, как правило, снабжаются карманами различной и зачастую весьма сложной формы. Несмотря на это, их (подшипники с внешним поддувом) можно разделить на следующие типы в зависимости от вида внешней цепи дросселирования, подаваемого под давлением газа:

- а) опоры с поддувом через капилляры (диаметром 0,3-0,8 мм), падение давления в которых происходит благодаря силам вязкости газа;
- б) опоры, в которых поддув осуществляется через отверстие с карманом (компенсация простой диафрагмой);
- в) опоры с поддувом через отверстие (компенсация кольцевой диафрагмой);
- г) опоры с поддувом через сопло и канавку малого сечения;
- д) опоры с поддувом через щели.

В последних четырёх опорах падение давления носит динамический характер.

Несколько особо стоят опоры с пористыми вкладышами, которые можно рассматривать как опоры с поддувом через большое число капилляров.

Наиболее широкое применение опоры скольжения с газовой смазкой нашли в США в машинах и приборах самого разнообразного назначения. В значительной мере это связано с тем, что ещё в 1962 году по инициативе группы инженеров и ученых была создана научно-исследовательская фирма Mechanical Technology Incorporated (MTI) в Лейтеме (штат Нью-Йорк, около г. Олбени), которая по существу возглавила в США большинство работ по экспериментальному и теоретическому исследованию подшипников с газовой смазкой.

Научно-исследовательская фирма MTI имело в штате 240 человек, из которых более половины ученые, специалисты в области машиностроения и инженеры с большим производственным опытом.

Уже в 1968 году объём работ фирмы МТИ оценивался в 6,5 млн. долларов хозяйственных работ. Из них 4,5 млн. долларов приходилось на научно-исследовательские и конструкторские работы по газовой смазке в различных отраслях машиностроения и, в первую очередь, в станкостроительной и инструментальной промышленности, турбо- и компрессоростроении, в гироскопах и гироскопических устройствах.

В турбомашинах газовые подшипники впервые применили в циркуляторах реакторов, охлаждаемых газом. В последующем опоры, смазываемые газом, стали применять в электрогенераторах для космических и земных условий, а затем в компрессорах и детандерах (пневмодвигателях), применяемых в криогенной, химической, нефтехимической промышленности, а также в высокотемпературных газовых турбинах, которые присоединяются к двигателям, и в газотурбинных приводах электрогенераторов для подводных лодок больших глубин. Конкретные примеры конструкции таких агрегатов приведены в работе [2].

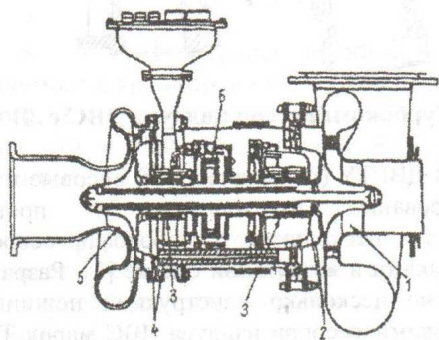


Рис. 1 - Турбокомпрессор на газовых подшипниках, работающий по циклу Брайтона: 1 - турбина; 2 - отражательный тепловой экран; 3 - подшипник; 4 - медные втулки; 5 - компрессор; 6 - упорный подшипник с самоустанавливающимися подушками

На рис. 1 представлен турбокомпрессор для работы по закрытому циклу Брайтона, рассчитанный для работы при температуре газа на входе в турбину до 815°C, скорости вращения ротора 38500 об/мин, температуре смазывающего газа 150°C. Рабочим телом является инертный газ. Установка предназначена для работы на космических аппаратах.

Подшипник, образованный тремя самоустанавливающимися подушками, выбран из соображений исключения прямой цилиндрической прецессии с угловой скоростью, равной половине угловой скорости вращения вала (неустойчивость типа полускоростного вихря). Две из этих подушек устроены так, что их шарнирная опора неподвижна, а у третьей шарнирная опора смонтирована на податливой диафрагме и через отверстия в этой подушке можно подавать газ для поддува при пусках и остановках. Путём пневматического нагружения податливой диафрагмы дополнительно нагружают

или разгружают подшипник и тем самым подавляют полускоростной вихрь.

Конечно, изготовление и монтаж такого трехсекционного подшипника требует большой тщательности и точности. Испытания показали, что применение пневматического устройства для дополнительного нагружения позволяло все время контролировать нагрузку так, чтобы непрерывно поддерживалось устойчивое движение ротора.

Испытания, как холодные, так и при нормальной работе установки (горячие) показали, что при надлежащих внешних условиях форма подшипника была аэродинамически удовлетворительна как при работе с поддувом, так и при работе подшипника в отсутствии поддува. Наличие крепления одной из пят на податливой диафрагме, осуществляющей дополнительное нагружение или разгружение, также дало весьма удовлетворительные результаты при малом термическом расширении. В условиях значительных термических расширений во время "горячей" работы турбокомпрессора необходимо предусматривать компенсацию термического расширения шарниров неподвижных пят. Описанное здесь подавление полускоростного вихря путём нагружения одной из плавающих подушек, закрепленной на податливой основе, является лишь одним из преимуществ применения подшипников, состоящих из самоустанавливающихся подушек, применительно к газовым подшипникам при работе их в условиях высоких температур.

Другими преимуществами такой конструкции являются:

- 1) способность компенсировать погрешности изготовления и монтажа ротора;
- 2) большая свобода в конструировании при компенсации изменения размеров, вызванного центробежными силами;
- 3) уменьшение чувствительности к заеданию или абразивному износу частицами абразива;
- 4) способность быть заранее нагруженными при высокой жёсткости, даже при нулевой нагрузке.

В рассматриваемом случае, как и при любом другом типе газового подшипника, важным является поведение его при трении в период пуска, остановки или вообще при трении с высокими скоростями. Подшипники, состоящие из секторных самоустанавливающихся подушек, имеют ещё одну специфическую особенность, которая заключается в том, что поскольку подшипник непрерывно приспособляется к положению вала, каждый из секторов подвергается высокочастотным колебаниям с малой амплитудой. Это может привести к поверхностному разрушению за очень короткий период времени, если имеется значительное относительное скольжение. При этом на двух поверхностях каждой из подушек происходит относительное движение поверхностей - это, во-первых, рабочая поверхность подушки и шейки вала, а, во-вторых, поверхность соприкосновения подушки с опорой, выполненной обычно в виде части сферы.

Особо опасны такие разрушения поверхностей при повышенных температурах. Поэтому вопрос о выборе соответствующих материалов очень важен для подшипников, работающих в газотурбинных установках. На базе этих разработок были изготовлены и испытаны газотурбинные установки с различными типами газовых подшипников, включая ленточные и лепестковые.

Параллельно с развитием лёгких авиакосмических турбомашин с газовыми опорами велись разработки и также более мощных двигателей для надводного и подводного флота. Так в период 1968-70 г. г. фирмой "Эшер Висс" (Швейцария) разработан проект судовой газотурбинной установки с газовыми подшипниками мощностью 7,36 МВт. Эта установка замкнутого цикла, предназначенная для работы с атомным реактором, имеющим в качестве теплоносителя гелий. Фирмой "MTI" (США) изготовлен и испытан опытный судовой турбовентилятор на паростатических подшипниках, выполненный по заказу военно-морского ведомства США.

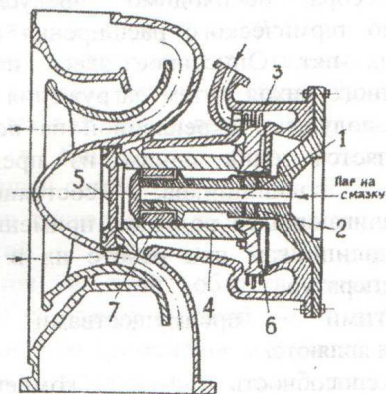


Рис. 2 - Судовой турбовентилятор на паростатических подшипниках фирмы МТИ (США)

Турбовентилятор (рис. 2) имеет неподвижный пустотелый вал 1, внутри которого насажены радиальные отверстия 2. Ротор вентилятора 4 выполнен в виде барабана, к которому по торцам крепятся паровая турбина привода 3 и диск вентилятора 5. Внутри барабана расположены подшипники 6 и 7, работающие по обращённой схеме. Турбовентилятор прошёл успешные испытания и передан заказчику. Следует отметить, что, начиная с 1964 года, военно-морское ведомство США является одним из основных заказчиков фирмы "MTI", что указывает на интенсивное продолжение работ в области создания турбомашин с газовыми опорами для нужд ВМС. В частности, сообщалось о создании той же фирмой высокотемпературных газотурбогенераторов с газовыми подшипниками для глубоководных морских установок.

В судовой ГТУ закрытого цикла мощностью 51,5 МВт (фирма "Эйр Ресерч", США) для поддержания ротора использованы газодинамические лепестковые подшипники. Фирмой "Рато" (Франция) разработана гелиевая ГТУ закрытого цикла мощностью 600 МВт. Этим работам предшествовали экспериментальные исследования

радиальных подшипников с сегментными вкладышами диаметром 300 мм на стенде с ротором массой 2т и частотой вращения до 3000 об/мин.

Подшипники с газовой смазкой эффективно используют в компактных быстроходных и высокотемпературных газотурбинных двигателях (ГТД). Применение подшипников с газовой смазкой в автомобильных ГТД связано с необходимостью увеличения ресурса подшипника, расположенного в зоне турбины и имеющего высокую рабочую температуру. Фирмами "Дженерал Моторс" и "Крайслер" (США) созданы образцы таких турбомашин.

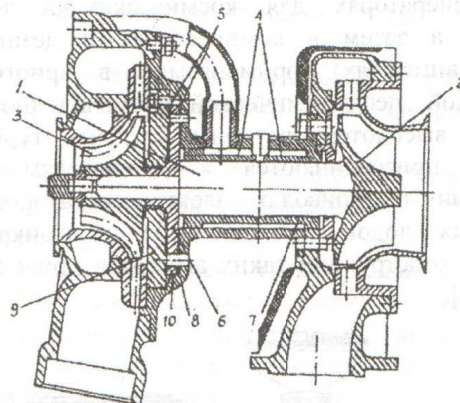


Рис. 3 - Турбокомпрессор наддува ДВС с ЛГП [8]

В ДВГТУ (г. Владивосток) впервые в стране спроектированы, изготовлены и проведены испытания нескольких турбокомпрессоров с подшипниками в воздушной смазке [3]. Разработано и испытано несколько конструкций подшипников для турбокомпрессоров наддува ДВС марок ТКР-8,5 и ТКР-11 (рис. 3). Наиболее работоспособными оказались ТКР с лепестковыми газодинамическими подшипниками (ЛГП). Турбокомпрессоры наработали десятки часов на различных режимах, в том числе при 68000 оборотов в минуту в предкомпажной зоне характеристики компрессора при температуре газов перед турбиной 760°C. На этом режиме температура радиальных подшипников составили 80°C, осевых - 143°C, виброскорость в горизонтальной плоскости - 0,7 мм/с, в вертикальной плоскости - 0,78 мм/с, виброускорение - 0,3g. При пусках и остановках турбокомпрессора с "тяжёлым" ротором последний начинал вращаться при давлении газа перед турбиной 0,114 МПа (0,14 ати). При остановке резкое падение частоты вращения наблюдалось при давлении газа перед турбиной 0,112 МПа. У турбокомпрессора с полым ротором вращение начиналась при давлении газов перед турбиной 0,105 МПа. Проведённые испытания показали, что работа турбокомпрессоров с ЛГП устойчива на всех режимах, и ЛГП весьма перспективны для применения в высокоскоростных малогабаритных турбокомпрессорах наддува.

Успешное применение газодинамических торцовых уплотнений роторов в последнее время возродило интерес к использованию газовых подшипников в газоперекачивающих агрегатах (ГПА) магистральных газопроводов. Примером может служить проект ГПА, помещаемого в

трубопровод (рис. 4) [4]. В этом случае ГПА имеет практически 100% заводскую готовность, что сводит к минимуму объем монтажных работ, отпадает необходимость в укрытиях, уменьшается потребность во вспомогательных сооружениях, в некотором количестве вспомогательного оборудования. Появляется возможность отказа от постоянно работающего персонала, что обеспечивает переход к вахтовому методу обслуживания КС. Данная концепция отвечает задаче строительства КС, число которых в связи со строительством новых линейных газопроводов будет неуклонно увеличиваться.

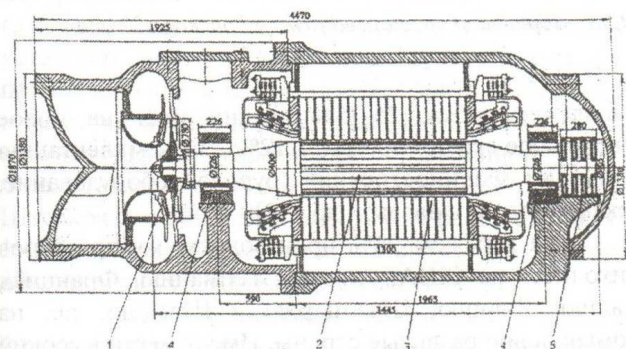


Рис. 4 - Газоперекачивающий агрегат помещаемый в трубопровод: 1 – рабочее колесо; 2 – ротор; 3 – электродвигатель; 4 – опорные подшипники с газовой смазкой; 5 – упорный подшипник

Следует также отметить, что в настоящее время идет активное внедрение принципиально новой технологии на мировом рынке малой энергетики, в основе которой лежит применение микрогазотурбинных генераторов. Главными разработчиками и производителями этих агрегатов являются страны: США, Великобритания, Япония, Швеция и Россия. Мощностной ряд составляет 30, 50, 60, 70, 75, 80, 100, 200, 250, 300, 375 и 400 кВт. Частота вращения ротора, соответствующая номинальной мощности, у разных агрегатов находится в диапазоне от 68000 до 96000 об/мин. Для этих условий работы многие фирмы, например Capstone (США) и Завод им. В.Я. Климова (Россия) используют только газодинамические подшипники. На сегодняшний день в России установлено около 400 микротурбин фирмы Capstone.

Впечатляющие успехи внедрения микрогазотурбинных технологий на мировом и российском рынке позволяют сделать вывод о возможности перенесения опыта этих технологий в область энергетических машин мощностью 500..2000 кВт, называемых мини-турбинами. Такой турбогенератор мощностью 1000 кВт разработан на московском ФГУП ММП "Салют" [5]. В качестве опор ротора агрегата массой 250 кг и частотой вращения 24300 об/мин использованы газостатические подшипники с самоустанавливающимися подушками (сегментами). В мае 2010г. Турбогенератор прошел успешные испытания [5].

Естественно, что при разработке новых агрегатов необходимо учитывать современные достижения в области материаловедения, технологии изготовления и мониторинга турбомашин.

Литература

1. Усков, М. К. Гидродинамическая теория смазки: Этапы развития, современное состояние, перспективы / М.К. Усков, В.А. Максимов. – М.: Наука, 1985. – 144с.
2. Максимов, В. А. Газовая смазка: перспективы применения в турбостроении / В.А. Максимов. – Казань: ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа", 2002. – 154с.
3. Самсонов, А.И. Научные основы проектирования подшипников с газовой смазкой для судовых турбомашин: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / А.И. Самсонова. – Владивосток, 1997. – 31с.
4. Селезнев, К. П. К вопросу разработки компрессорных станций с размещением газоперекачивающих агрегатов в магистральном газопроводе / К.П. Селезнев [и др.] // Турбины и компрессоры. – 1999. – №8-9 – С.69-72.
5. Бесчастных, В.Н. Газовые подшипники для турбоагрегатов. Перспективы внедрения / В.Н. Бесчастных // Газотурбинные технологии. – 2010. – №11. – С.10-14.
6. Максимов В.А. К вопросу классификации "сухих" газодинамических уплотнений компрессорных машин, особенности конструирования / Максимов В.А., Хайсанов В.К., Новиков Е.А., Деменьтьев В.А., Серазутдинов М.Н. // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №16. – С.136-139.
7. Максимов В.А. Оптимизация гидродинамических упорных подшипников типа Митчеля / Максимов В.А., Хадиев М.Б., Галиев Р.М. // Вестник машиностроения. – 2012. – №1. – С.31-40.

© Т. В. Максимов - ст. препод. каф. компрессорных машин и установок КНИТУ; В. А. Максимов - д-р техн. наук, проф., зав. каф. компрессорных машин и установок КНИТУ, с.н.с. ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», smu@kstu.ru; А. Г. Егоров - ст. препод. той же кафедры.