

УДК 621.8

Практика проектирования газовых подшипников для холодильных машин.

Часть I. Обзор газовых подшипников

Канд. физ.-мат. наук, канд. экон. наук **П.В. БУЛАТ**, pavelbulat@mail.ru,
Университет ИТМО, С.-Петербург

В настоящей статье рассмотрены перспективы применения газовых подшипников. Определилось несколько областей техники, в которых использование подшипников на газовой смазке считается наиболее целесообразным: микротурбины для распределенных энергетических систем, криогенная техника, турбохолодильные агрегаты и детандеры. В двух последних случаях важным является отсутствие загрязнения газов и продуктов охлаждения масляной смазкой. Рассмотрены история разработки бесконтактных газовых подшипников, практика их проектирования, существующая классификация и методы расчета. Приведены базовые сведения о типичных конструктивных решениях при проектировании газовых подшипников. Рассмотрены преимущества гибридных газовых подшипников, совмещающих достоинства газодинамических и газостатических подшипников. Показано, что применение гибридных газовых подшипников позволяет преодолеть основной недостаток холодильных машин и детандеров, оснащенных лепестковыми и фольговыми газодинамическими подшипниками, — недостаточную производительность из-за низкой несущей способности подшипника.

Ключевые слова: газостатический подшипник, газодинамический подшипник, гибридный газовый подшипник, лепестковый подшипник, газовая смазка.

PRACTICE OF GAS BEARINGS DESIGN FOR REFRIGERATING MACHINES PART I. OVERVIEW OF GAS BEARINGS

Candidate of physico-mathematical sciences **P.V. BULAT**

The article deals with the perspectives of the gas bearings use. Several engineering areas were formed where the application of gas-film lubricated bearings was considered as rational: micro turbines for distributed energy systems, cryogenic engineering, turborefrigerating aggregates and expanders. It is important in two last cases that gases and products to be refrigerated should be not contaminated by oil lubrication. The history of the contactless gas bearings development, the practice of their design, an appropriate classification and the calculation methods are examined. Basic data on typical constructive solutions at the gas bearings design are cited. The advantages of the hybrid gas bearings combining the merit of gasodynamic and gasostatic bearings are examined. It is shown that the application of the hybrid gas bearings allows getting over the main disadvantage of refrigerating machines and expanders equipped with the leaf-type and foil gasodynamic bearings that is an insufficient capacity due to a low load-carrying capacity.

Keywords: gasostatic bearing, gasodynamic bearing, hybrid gas bearing, leaf-type bearing, gas lubrication.

Введение

Практика проектирования турбомашин, в частности турбохолодильных агрегатов, сталкивается с новыми тенденциями: возросли скорости вращения вала и нагрузки. Это заставляет проектировщиков искать новые решения, в том числе новые способы сжатия газа. В большинстве случаев задача ограничения размеров и стоимости агрегатов решается увеличением быстроходности их роторов. Примером нетривиального подхода может служить замена традиционных лопаточных машин волновыми компрессорами, которые сжимают газ в системе ударных волн [1,2], что существенно

упрощает конструкцию, но требует высокой частоты вращения ротора.

В последние годы значительно возрос интерес к подшипникам скольжения с газовой смазкой. Для таких подшипников могут быть использованы для создания подъемной силы аэродинамический эффект Бернулли (газодинамические подшипники — ГДП) или подача воздуха в зазор между статором и ротором под давлением (газостатические подшипники — ГСП) [11]. Возможно и совмещение этих двух эффектов (гибридные ГСП). Определилось несколько областей техники, где применение под-

шипников на газовой смазке считается наиболее целесообразным:

- ✓ криогенная техника, турбохолодильные агрегаты и детандеры;
- ✓ микротурбины для распределенных энергетических систем;
- ✓ авиационные газотурбинные установки, прежде всего вспомогательные.

Наиболее перспективно использовать бесконтактные подшипники на газовой смазке в турбохолодильных агрегатах (ТХА) и турбодетандерных агрегатах. В этих случаях важным является отсутствие загрязнения газов и продуктов охлаждения масляной смазкой.

В области создания машин с легкими роторами уже достигнут значительный прогресс. На современном этапе стоит задача создания бесконтактных газовых подшипников для быстроходных тяжелых роторов турбомашин. На этом пути имеется ряд сложностей принципиального характера.

Воздушные турбохолодильные агрегаты (ТХА). Обострение экологической обстановки, связанное с разрушением озонового слоя земли и развивающимся глобальным потеплением, потребовало создания холодильных машин нового поколения, работающих на озонобезопасных природных хладагентах, в число которых входит вода, воздух, диоксид углерода, аммиак, углеводороды. Наиболее универсальным из них является атмосферный воздух. Установки с воздушным холодильным циклом способны работать в диапазоне от комнатной температуры до температуры жидкого воздуха. ТХА, представляющие собой высокооборотные турбомашин, производят одновременно с холодом высокопотенциальное тепло, которое можно использовать в производственных целях.

Турбодетандерные агрегаты. Этот тип турбоагрегатов используется в установках разделения воздуха. Применение газодинамических подшипников позволяет отказаться от использования масляного тумана для смазки шариковых подшипников, в результате чего гарантируется чистота газа, упрощается эксплуатация и повышается надежность агрегата. В настоящее время в турбодетандерах применяются ГДП (рис. 1), для которых, как правило, характерна низкая несущая способность (масса ротора не более 10–20 кг). В результате агрегаты на ГДП уступают классическим турбодетандерам в производительности в 10 и более раз. Выход видится в применении ГСП. Но работа ГСП сопровождается постоянным расходом рабочего тела на поддув, что сказывается на экономичности установки.



Рис. 1. Лепестковый газодинамический подшипник турбодетандера

Поэтому перспективно совмещение достоинств ГСП и ГДП в одной конструкции. Такие подшипники называются гибридными.

История развития теории газовой смазки

Теория газовой смазки получила развитие в конце XIX в. в работах Петрова, Рейнольдса, Зоммерфельда, Чаплыгина [10]. Второй рывок в ее развитии произошел в 60-е годы XX в. и был связан с массовым внедрением газовых турбин. Основоположителем газодинамической теории газовой смазки считается профессор Н.П.Петров, который в 1883 г. опубликовал в «Инженерном журнале» статью «Трение в машинах» [4]. Возможность использования воздуха в качестве смазочного вещества была проверена А. Kingsbury [15] и W.Harrison [14]. Однако впервые работа вала в опорах скольжения с несжимаемой смазкой была полностью исследована во второй половине XIX в. в работах В. Tower и О. Reynolds. Последний в 1886 г. опубликовал статью «Гидродинамическая теория смазки и ее применение к опытам В. Tower» [16]. Первый патент на газовый подшипник был оформлен в США в 1894 г. Гидродинамическая теория смазки для случая гладкого цилиндра в коаксиальной опоре была завершена в работах А. Зоммерфельда, А. Мичеля, Н.Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина [3].

Теория газовой смазки глубоко разрабатывалась в Советском Союзе. Основных научных центров в данной области было два: Экспериментальный НИИ металлорежущих станков (ЭНИМС), в котором работы велись под руководством С.А.Шейнберга [7], а также кафедра механики и математики Ленинградского политехнического института (ЛПИ), на которой под научным руководством Л.Г.Лойцянского [11] осуществлялась разработка теории гироскопов на газовом подвесе, а также газостатических узлов для точной выверки приборов.

Сегодня газовые опоры используются в газотурбинных двигателях (ГТД), криогенных и высокотемпературных космических, наземных, транспортных и глубоководных установках, компрессорах атомных реакторов. Всплеск интереса к данной тематике наблюдался в 60-е годы прошлого века. Именно тогда появились фундаментальные труды С.А.Шейнберга [7] и V.N.Constantinescu [12], Г.Риппела [6], Н.Грессема и Дж.Пауэлла [5,13], обобщившие все известные на тот момент теоретические и экспериментальные результаты.

Классификация газовых подшипников

Классификация по направлению действия сил. Подшипники делят на радиальные, радиально-упорные и упорные (осевые). Как следует из названия, радиальный подшипник препятствует смещению вращающегося вала в поперечном (радиальном) направлении, соответственно упорный (осевой) — в продольном (осевом) направлении, радиально-упорный — в двух направлениях одновременно.

Классификация по принципу создания подъемной силы. В теории газовой смазки существует три принципа создания избыточного давления в газовом слое опор, названные принципами газовой смазки:

- ✓ эффект клина;
- ✓ эффект внешнего нагнетания смазки;
- ✓ эффект колеблющейся стенки.

Наличие трех принципов значительно расширяет область применения опор скольжения с газовой смазкой. Наложение принципов приводит к гибридным опорам, например: внешнее нагнетание смазки плюс эффект клина; колеблющаяся стенка плюс эффект клина.

Как было указано ранее, по принципу создания подъемной силы все подшипники делятся на газостатические (подъемная сила создается подаваемым внешним устройством под избыточным давлением воздухом), газодинамические (подъемная сила создается за счет эффекта клина), а также гибридные (имеют место оба эффекта). При вращении вала вследствие сил вязкого трения подъемная сила возникает всегда (эффект Бернулли).

Классификация по форме несущей поверхности. Радиальные подшипники бывают сегментными, а также цилиндрическими с охватом 360°. Последние еще называют полноохватными.

Конструкция воздушных подшипников

Газодинамические подшипники. Традиционная схема лепесткового ГДП изображена на рис. 2. В корпусе подшипника выполнены продольные пазы, в которых закреплены изготовленные из пружинной стали лепестки (показаны красным цветом на рис.2), образующие непрерывную поверхность, составленную из клиньев.

Когда вал неподвижен, лепестки за счет упругости касаются поверхности вала и поддерживают его в подвешенном состоянии (рис. 2, в). При начале вращения вала на лепестках под воздействием эффекта Бернулли возникают аэродинамические силы. С увеличением частоты вращения эти силы растут, пока их величина не становится достаточной для отделения лепестков от вала (рис. 2, б). Отсутствие контакта лепестков с валом позволяет реализовать очень большие скорости вращения. Однако у ГДП имеются и существенные недостатки. При каждом

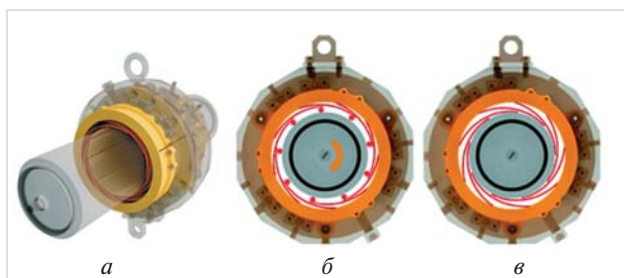


Рис. 2. Типичная конструкция лепесткового газодинамического подшипника:
а – общий вид; б – подшипник в рабочем состоянии;
в – подшипник при неподвижном вале



Рис. 3. Фольговые газодинамические подшипники корейской фирмы KIST

старте и торможении происходит износ антифрикционного покрытия, которое наносится на поверхность лепестков, контактирующих с валом, поэтому ресурс такой опоры прямо зависит от режима работы и количества стартов и торможений.

Одной из главных проблем применения такого типа подшипников является обеспечение надежной работы антифрикционного покрытия в условиях высоких температур (>650°С), поэтому в разработке жаростойких антифрикционных покрытий уделяется большое внимание [8]. Исследования твердых смазочных высокотемпературных покрытий, необходимых для ГДП, проводились в NASA по заказу Министерства энергетики США. Основным покрытием в США считается покрытие марки PS304, способное работать при температуре 650°С [8]. Технология получения (нанесения) твердых смазочных покрытий включает детонационные и плазменные способы. Достижения в этой области определили коммерческий успех малых газотурбинных установок, использующих ГДП [9, 17].

В газодинамических подшипниках третьего поколения воздушная пленка, возникающая при вращении, формируется между поверхностью вала и гибкой гладкой металлической фольгой, которая, в свою очередь, опирается на пружинящую гофрированную ленту (рис. 3). Такая конструкция позволяет компенсировать в определенных пределах колебания и перегрузки.

Газостатические подшипники. С помощью радиального ГСП можно заставить вал вращаться, не касаясь неподвижных стенок во всем диапазоне рабочих частот вращения. Для этого через систему специальных дросселей и сопел (рис. 4) в зазор между валом и подшипником подается газ под избыточным давлением. Такой подшипник в отличие от газодинамических работает полностью в бесконтактном режиме, так как в моменты старта и остановки ротор вывешивается при помощи системы управления, т.е. он всплывает и висит на прослойке сжатого воздуха, а уже потом раскручивается.



Рис. 4. Схема газостатического подшипника

Гибридные газостатические подшипники. В ряде работ предлагается использовать в ГСП сегменты, один край которых не закреплен и может перемещаться под воздействием сил давления (рис. 5).

Если правильно подобрать ось вращения, то сегмент будет самостоятельно поворачиваться на заданный угол атаки в зависимости от частоты вращения ротора и нагрузки на вал и устойчиво сохранять это положение. Такие подшипники называются гибридными с самоустанавливающимися вкладышами. Сегментные гибридные подшипники при небольшой частоте вращения вала работают как ГСП, а на больших оборотах — как ГДП. Таким образом достигается сочетание лучших качеств подшипников обоих типов.

Заключение

Рассмотрены газовые подшипники различных типов. Приведено их сравнение между собой. Показано, что гибридные ГСП имеют решающее преимущество за счет полностью бесконтактной работы.

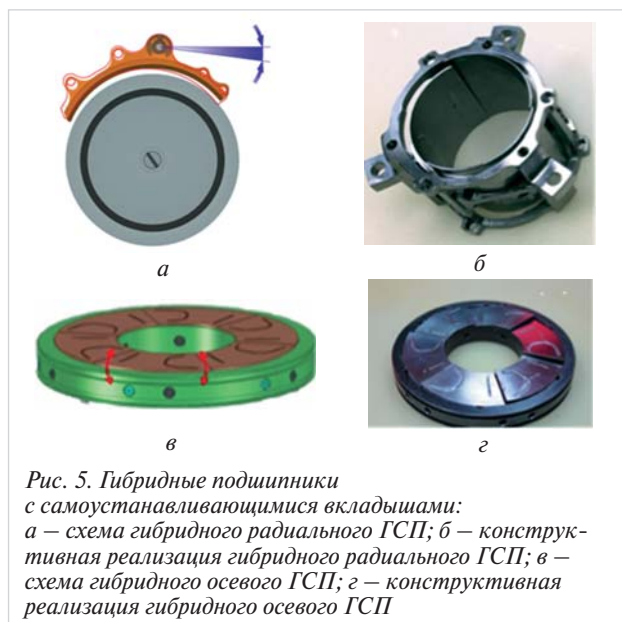


Рис. 5. Гибридные подшипники с самоустанавливающимися вкладышами: а — схема гибридного радиального ГСП; б — конструктивная реализация гибридного радиального ГСП; в — схема гибридного осевого ГСП; г — конструктивная реализация гибридного осевого ГСП

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат П.В. О концепции волнового компрессора и оптимальных ударно-волновых структурах// Холодильная техника. 2014. №6. С. 14–18.
2. Булат П.В. О концепции волнового компрессора и оптимальных ударно-волновых структурах// Холодильная техника. 2014. №7. С. 14–16.
3. Гидродинамическая теория смазки. Классики естествознания / под ред. Л.С. Лейбензона. — М.; Л.: Гостехиздат, 1934. — 562 с.
4. Петров Н.П. Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости // Инженерный журнал, 1883.
5. Подшипники с газовой смазкой/ под ред. Н.С.Грессема., Дж.У.Пауэлла. — М.: Мир. 1966. — 415 с.
6. Проектирование гидростатических подшипников/ под ред. Гарри Риппела; пер. с англ. Г.А.Андреевой. — М.: Машиностроение, 1967. — 135 с.
7. Шейнберг С.А. Опоры скольжения с газовой смазкой. — М.: Машиностроение, 1969. — 336 с.
8. Bhushan C. B. and Gray S. Static evaluation of surface coatings compliant gas bearings in an oxidizing atmosphere to 650// Thin Solids Films, 53 (1978), 313–331.
9. O'Brien Patrick. Development of a 50-kW low-emission turbogenerator for hybrid electric vehicles// J.ASME, 98-Gt-400. Presented at International Gas and electric Aero engineers, Congress and Exhibition, Stockholm, Sweden, June 2–5, 1998.
10. Bulat P.V. The history of the gas bearings theory development/ P.V. Bulat, M.P. Bulat // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 27/ №7.
11. Bulat P.V., Bulat M. P. Basic Classification of the Gas-Lubricated Bearings// World Applied Sciences Journal. 2013. V.28(10), p.1444–1448.
12. Constantinescu V. N. Lubrificatia cu gaze? Bucuresti, 1963.
13. Gas Lubricated Bearing. Editors N.S.Grassam, J.W.Powell. Micro Turbine Developments Ltd. London, Butterworths, 1964. 398 p.
14. Harrison W.J. The hydrodynamic theory of lubrication with special reference to air as a lubricant// Trans. Cambr. Phil. Soc. 22, 39, 1913.
15. Kingsbury A. Experiments with an air—lubricated bearing// J. Am. Soc. nav. Engrs., 9, 267, 1897.
16. Reynolds O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil// Royal Society/ Phil. Trans., Pt. 1, 1886, 114 p.
17. Swanson E.E., Walton J.F., Heshmat H. A Test Stand for Dynamic Characterization of Oil-Free Bearings for Modern Gas Turbine Engines // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002 June 3-6, 2002, Amsterdam, The Netherlands (GT-2002-30005).

REFERENCES

1. Bulat P.V. About the concept of a wave compressor and optimal shock-wave structures// Kholodilnaya Tekhnika. 2014. №6. P.14–18
2. Bulat P.V. About the concept of a wave compressor and optimal shock-wave structures// Kholodilnaya Tekhnika. 2014. №7. P.14–16
3. Hydrodynamic theory of lubrication. Klassiki estestvoznaniya/ Edited by L.S. Leybenzon. — M/L.: Gostekhizdat, 1934. 562 p.
4. Petrov N.P. Friction in machines and lubricating liquid influence on it // Inzhenerny zhurnal, 1883
5. Gas lubricated bearings / Editors N.S. Grassam, J.W. Powell. —M.: Mir. 1966. —415 p.
6. Design of hydrostatic bearings/ Editor Harry Rippel. Translation from English by G.A. Andreeva. —M.: Mashinostroenie, 1967. — 135 p.
7. Sheinberg S.A. Gas lubricated sliding support. — M.: Mashinostroenie, 1969. —336 p.
8. Bhushan C. B. and Gray S. Static evaluation of surface coatings compliant gas bearings in an oxidizing atmosphere to 650// Thin Solids Films, 53 (1978), 313–331.
9. O'Brien Patrick. Development of a 50kW lowemission turbogenerator for hybrid electric vehicles// J.ASME, 98Gt400. Presented at International Gas and electric Aero engineers, Congress and Exhibition, Stockholm, Sweden, June 25, 1998.
10. Bulat P.V. The history of the gas bearings theory development. / P.V. Bulat, M.P. Bulat // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 27/ №7.
11. Bulat P.V., Bulat M. P. Basic Classification of the GasLubricated Bearings// World Applied Sciences Journal. 2013. V.28(10), P.1444–1448.
12. Constantinescu V. N. Lubrificatia cu gaze? Bucuresti, 1963.
13. Gas Lubricated Bearing. Editors N.S.Grassam, J.W.Powell. Micro Turbine Developments Ltd. London, Butterworths, 1964. 398 p.
14. Harrison W.J. The hydrodynamic theory of lubrication with special reference to air as a lubricant// Trans. Cambr. Phil. Soc. 22, 39, 1913.
15. Kingsbury A. Experiments with an air—lubricated bearing// J. Am. Soc. nav. Engrs., 9, 267, 1897.
16. Reynolds O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil// Royal Society/ Phil. Trans., Pt. 1, 1886, 114 p.
17. Swanson E.E., Walton J.F., Heshmat H. A Test Stand for Dynamic Characterization of OilFree Bearings for Modern Gas Turbine Engines // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002 June 36, 2002, Amsterdam, The Netherlands (GT200230005).