

УДК 628.1

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОДКИ С СЕРПОВИДНЫМ СОПЛОМ NUMERICAL STUDY OF PADS WITH SICKLE NOZZLE

Булат Михаил Павлович

аспирант кафедры Холодильных машин и
низкопотенциальной энергетики.
Университет ИТМО
Тел.: +7(9211) 427-20-91
bulat_mh@mail.ru

Бесчастных Владимир Николаевич

Кандидат технических наук, главный конструктор.
ООО «ЦТТ «Кулон»
Тел.: +7(812) 680 17 08
vbes2@yandex.ru

Bulat Michail Pavlovich

Postgraduate.
ITMO University
Ph.: +7(921) 427-20-91
bulat_mh@mail.ru

Beschastnyih Vladimir Nikolaevich

Candidate of engineering, chief designer.
TTC «Kulon» Ltd
Тел.: +7(812) 680 17 08
Ph.: vbes2@yandex.ru

Аннотация. Цель данной работы – проведение численного исследования параметров колодки газового подшипника с серповидным соплом системы подачи газа в зазор. Сейчас в мире наиболее распространены газодинамические подшипники, отличающиеся низкой грузоподъемностью, неустойчивостью к перегрузкам и невысоким ресурсом. Такие подшипники имеют в своей конструкции покрытие, изнашивающееся при каждом пуске или остановке ротора, поскольку силы, удерживающие вал в воздухе, появляются при достижении определенной скорости вращения. Это делает целесообразным разработку нового типа подшипников, свободных от указанных недостатков. Гибридный подшипник, сочетающий в себе технологии газостатического и газодинамического, рассматривается в данной статье. Исследуется геометрия с серповидным соплом, повторяющим изолинии решения уравнения Рейнольдса.

Ключевые слова: газостатический подшипник, газодинамический подшипник, гибридный подшипник, колодка гибридного подшипника, грузоподъемность.

Annotation. The purpose of this work – numerical investigations of parameters of the gas bearing pads with falciform nozzle in gas supply system in the gap. Nowadays the most common in the world gas-dynamic bearings are characterized by their low bearing capacity, instability at overloads and low resource. These bearings have coating in their construction which wearing off with every start or stop of the rotor, because the forces that hold the shaft in the air appear only upon attaining a certain speed. This makes development of a new type of bearing, free from these drawbacks expedient. Hybrid bearings, that combines the technology of gas-static and gas-dynamic bearings, is considered in this article. The geometry of a falciform nozzle, repeating contours solving the Reynolds equation is studied.

Keywords: gas-static bearing, gas-dynamic bearing, hybrid gas bearing, bearing capacity.

Введение

В течение последних лет исследователи по всему миру активно занимаются разработкой подшипников на газовой смазке. Такой возросший интерес связан с тем фактом, что традиционные методы повышения эффективности работы турбомашин практически исчерпали себя – потребовалось новое техническое решение. Были даже созданы работоспособные устройства в составе газотурбинных установок малой мощности, однако в связи со сложностью масштабирования, перенести эти разработки на тяжелые роторы до сих пор не удалось. Тем не менее, газовые подшипники остаются перспективным решением для систем с быстро вращающимися роторами.

Эффект применения подшипников на газовой смазке вместо шариковых и роликовых на авиационных и силовых газотурбинных двигателях (ГТД) состоит в: усилении пожарной безопасности в связи с отсутствием масляной системы, уменьшении массы двигателя, повышении ресурса его работы с одновременным снижением общих экономических затрат, особенно эксплуатационных. При этом существенно расширяются перспективы создания высокооборотных двигателей с более высокими удельными показателями [1], также высоко эффективных криогенных и газоразделительных машин [2].

В настоящий момент в мире наиболее распространены газодинамические подшипники (ГДП), подъемная сила в которых создается за счет эффекта Бернулли при раскрутке ротора до высоких скоростей. Именно этот тип опор нашел свое применение на рынке газотурбинной техники. К сожалению, ГДП из-за своего принципа действия обладают рядом недостатков, например, низкой грузоподъемностью, низким ресурсом. Следовательно, при проектировании газовых подшипников приходится решать задачу обеспечения высокой эксплуатационной надежности работы в условиях вибраций и перегрузок, существенного повышения грузоподъемности, а также увеличение ресурса.

Наиболее перспективным для решения поставленных задач из общего семейства газовых подшипников является применение газостатического подшипника (ГСП), однако для него, в отличие от газодинамического подшипника, требуется система управления, регулирующая положение вала и не допускающая его касания со статором, а также постоянный поддув газа, что снижает экономичность ГТД.

ГСП достаточно широко используется в лабораторных столах, весах и других приборах, где требуется прецизионная точность перемещений при сравнительно большой грузоподъемности.

Хотя вопрос колебаний ротора в подшипниках на газовой смазке достаточно изучен [3, 4], используемая газостатическая схема подшипника не нашла до сих пор широкого применения на крупных объектах с быстро вращающимися валами из-за нерешенности вопроса быстрого действия традиционных систем управления, подающих воздух в зазор между статором и ротором. Оригинальным решением в данной ситуации может стать гибридный подшипник с самоустанавливающимися по углу атаки сегментами, сочетающий в себе преимущества ГСП и ГДП, и не нуждающийся в системе управления. У сегментов положение оси с помощью расчетов подбирается таким образом, что развернувшись на нужный угол атаки, сегмент занимает устойчивой положение, т.е. он обладает свойством статической устойчивости по углу атаки. При возникновении перегрузки сегменты поворачиваются автоматически под действием аэродинамических сил, что является следствием изменения величины зазора между сегментами и валом. Такое движение также должно быть устойчивым, т.е. сегмент должен быть динамически устойчивым по перегрузке.

Пример расчета такого подшипника рассмотрен в данной статье.

Методика расчета

Объектом исследования является радиальный гибридный газовый подшипник. Общий подход к расчету гибридных подшипников приведен в [5], примеры расчетов в приложении к сегментным подшипникам – в [6, 7]. В нашей задаче исследование велось следующим образом:

Геометрия расчетной области приведена на рисунке 1, исходные данные на рисунке 2.

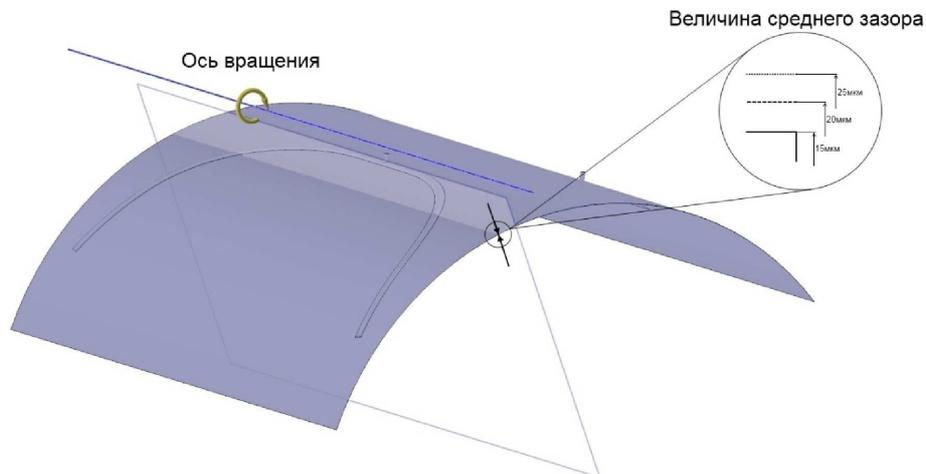


Рисунок 1 – Геометрия расчетной области представляет собой зазор между валом и поверхностью подшипника

Расчет производился по ламинарной модели. Разностная сетка состоит из тетраэдральных элементов. Ранг сетки в радиальном направлении принят на уровне 1 мм, в окружном направлении 1–2 мм, в осевом (перпендикулярно зазору) 2 мкм. В местах резкого изменения сечений было выполнено сгущение расчетной сетки.

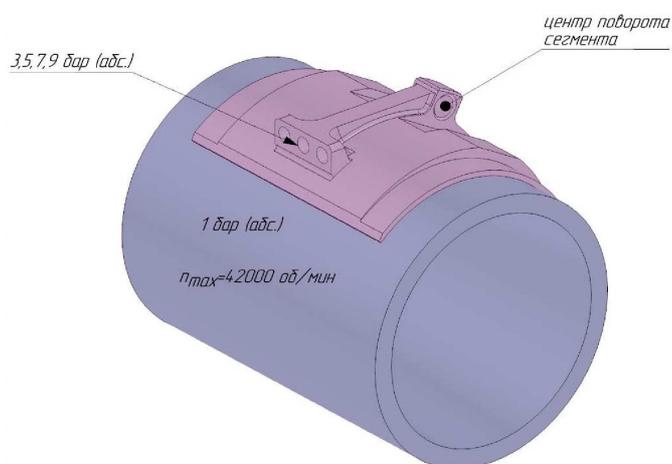


Рисунок 2 – Условия задачи

Начальные условия:

- Рабочая среда – воздух.
- Температура воздуха – 20 °С.
- Частота вращения упорного диска (диапазон) – 0–42 000 об/мин.

Граничные условия:

- Давление на периметре сегмента – 1 бар (абс)
- Давление питающего воздуха – 3, 5, 7, 9 бар (абс)
- Условия непротекания на стенках

Результаты расчетов и анализ

Значения, полученные в результате расчетов для среднего зазора в 25 мкм, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты численных расчетов радиального подшипника

| № | Условный средний зазор, мкм | Зазор по выходной кромке h , мкм | Зазор по входной кромке, мкм | Частота вращения диска, об/мин | Давление подачи, атм | Расход, г/с | Подъемная сила, Н | Момент, Нм |
|----|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------|
| 1 | 25 | 20 | 30 | 42000 | 3 | 0,21 | 172 | -0,53 |
| 2 | | | | | 5 | 0,32 | 250 | -0,85 |
| 3 | | | | | 7 | 0,43 | 335 | -1,14 |
| 4 | | | | | 9 | 0,55 | 396 | -1,48 |
| 5 | 25 | 15 | 35 | 42000 | 3 | 0,20 | 219 | 0,09 |
| 6 | | | | | 5 | 0,32 | 276 | -0,12 |
| 7 | | | | | 7 | 0,44 | 355 | -0,22 |
| 8 | | | | | 9 | 0,55 | 417 | -0,40 |
| 9 | 25 | 10 | 40 | 42000 | 3 | 0,21 | 295 | 0,98 |
| 10 | | | | | 5 | 0,33 | 348 | 0,89 |
| 11 | | | | | 7 | 0,44 | 413 | 0,85 |
| 12 | | | | | 9 | 0,56 | 457 | 0,70 |

На графике (рис. 3) приведены результаты расчетов зависимостей грузоподъемности опоры от давления и расхода подаваемого воздуха для трех различных углов атаки. С увеличением угла атаки подъемная сила растет, тогда как расход остается неизменным, т.е. в большей степени проявляется эффект Бернулли. С увеличением угла атаки вращающий момент на сегменте вначале поворачивает его в сторону увеличения угла атаки, но сам момент постепенно уменьшается, пока не будет достигнуто положение равновесия, когда момент равен нулю. При продолжении вращения сегмента момент становится отрицательным и стремится вернуть сегмент в устойчивое положение.

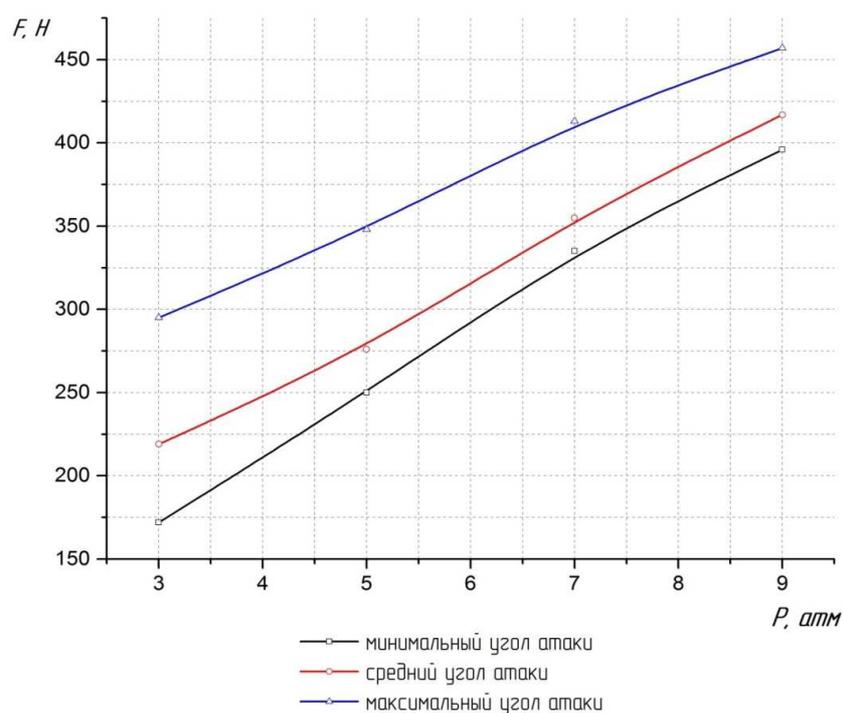


Рисунок 3 – Изменение грузоподъемности в зависимости от давления подачи

Заключение

Приведены сведения о возможном применении подшипников на газовой смазке в современной технике. Описаны преимущества использования гибридных подшипников над распространенными ГСП и ГДП. Кратко приведена методика и описан порядок расчета гибридного газового подшипника с самоустанавливающимися сегментами и серповидным соплом, распределяющим воздух по поверхности. Приведены результаты расчетов, выполнен анализ, в ходе которого было доказано наличие эффекта саморегулирования в данной конструкции подшипника.

Литература:

1. Бесчастных В.Н., Булат П.В. Практика проектирования газовых подшипников для холодильных машин. Часть II. Проектирование и методика расчета гибридных подшипников // Холодильная техника. – 2015. – № 8. – С. 17–20.
2. Смирнова О.С., Булат П.В., Продан Н.В. Применение управляемых газо- и гидростатических подшипников в турбонасосных агрегатах многофазовых комбинированных ЖРД // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4 (Ч. 2). – С. 335–39. – URL : <http://www.rae.ru/fs/pdf/2013/4-2/31193.pdf>
3. Булат П.В., Усков В.Н. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи // Вестник международной академии холода. – 2012. – № 3. – С. 3–7. – URL : <http://vestnikmax.com/vestnikmax.ru/?q=ru/node/413>

4. Булат П.В., Усков В.Н. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы // Вестник международной академии холода. – 2013. – Ч. 2 (В. 1). – С. 57–60. – URL : <http://vestnikmax.com/vestnikmax.ru/?q=ru/node/349>
5. Булат П.В. Практика проектирования газовых подшипников для холодильных машин. Часть I. Обзор газовых подшипников // Холодильная техника. – 2015. – № 8. – С. 2–6.
6. Бесчастных В.Н., Равикович Ю.А. Определение статической грузоподъемности сегментного газостатического подшипника // Вестник МАИ. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 91–98.
7. Листопадов И.В., Шершнева Б.Б., Моделирование сегментного газового подшипника // ANSYS Solutions. Русская редакция. – Зима 2006. – С. 43–45.

References:

1. Beschastnykh V.N., Bulat P.V. Practice of design of gas bearings for refrigerators. Part II. Design and method of calculation of hybrid bearings // Refrigerating equipment. – 2015. – № 8. – P. 17–20.
2. Smirnova O.S., Bulat P.V., Prodan N.V. Use of the operated gazo- and hydrostatic bearings in turbo-pump units of the reusable combined ZhRD // Basic researches. – 2013. – № 4 (Ch. 2). – P. 335–39. – URL : <http://www.rae.ru/fs/pdf/2013/4-2/31193.pdf>
3. Bulat P.V., Uskov V.N. About research of an oscillating motion of gas subweight of a rotor turbo-refrigerator and the detandernykh of cars. Part I. Problem definition // Bulletin of the international academy of cold. – 2012. – № 3. – P. 3–7. – URL : <http://vestnikmax.com/vestnikmax.ru/?q=ru/node/413>
4. Bulat P.V., Uskov V.N. About research of an oscillating motion of gas subweight of a rotor turbo-refrigerator and the detandernykh of cars. Part II. Fluctuations of pressure in nozzles of the feeding system on a supercritical operating mode // Bulletin of the international academy of cold. – 2013. – Ch. 2 (V. 1). – P. 57–60. – URL : <http://vestnikmax.com/vestnikmax.ru/?q=ru/node/349>
5. Bulat P.V. Practice of design of gas bearings for refrigerators. Part I. Review of gas bearings // Refrigerating equipment. – 2015. – № 8. – P. 2–6.
6. Beschastnykh V.N., Ravikovich YU.A. Determination of static loading capacity of the segment gas-static bearing // MAI bulletin. – 2009. – V. 16. – № 1. – P. 91–98.
7. Listopadov I.V., Shershnev B.B. Modeling of the segment gas bearing // ANSYS Solutions. Russian edition. – Winter, 2006. – P. 43–45.