

## РАСЧЕТ ГИБРИДНОГО ТРЕХЛЕПЕСТКОВОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА

<sup>1</sup>Булат М.П., <sup>2</sup>Продан Н.В.

<sup>1</sup>ЗАО «Бизнес Компьютер Центр», Санкт-Петербург, e-mail: bulat\_mh@mail.ru;

<sup>2</sup>ООО «Проблемная лаборатория «Турбомашины», Санкт-Петербург, e-mail: kolinti@mail.ru

В перспективных многорежимных летательных аппаратах планируется использовать комбинированные турбо-прямоточные и турбо-ракетные двигатели. Применение технологии бесконтактных опор позволит существенно повысить ресурс работы таких важных частей, как компрессоры и турбонасосные агрегаты. На данный момент в мире в авиакосмической технике наиболее распространены не газостатические, а газодинамические подшипники. Они характеризуются наличием поддерживающего слоя различных конструкций, который обеспечивает работоспособность роторов на запуске и остановке. Главная проблема подшипника данного типа помимо сложности конструкции состоит в изнашиваемости этого поддерживающего слоя. Газостатический подшипник лишен подобного недостатка, так как физический контакт твердых поверхностей между собой отсутствует. В данной статье приведены результаты расчета гибридного подшипника, сочетающего в себе обе технологии. Рассмотрены зависимости основных параметров от скорости вращения вала, а также исследована аэродинамическая устойчивость колодок на разных режимах работы.

**Ключевые слова:** газостатический подшипник, газодинамический подшипник, гибридный подшипник, колодка гибридного подшипника

## CALCULATION OF THE HYBRID THREEFOLD BEARING USING PRESSURIZED AIR

<sup>1</sup>Bulat M.P., <sup>2</sup>Prodan N.V.

<sup>1</sup>Business Computer Center Ltd, St. Petersburg, e-mail: bulat\_mh@mail.ru;

<sup>2</sup>Problem Laboratory «Turbomachine» Ltd, St. Petersburg, e-mail: kolinti@mail.ru

In perspective multi-mode aircraft will use the combined direct-flow turbo and turbo-rocket engines. Application of the technology of air bearings will significantly improve the life of the important parts, like compressors and turbo pump assemblies. At this point in the world in the aerospace engineering the most common gas-dynamic bearings, not bearing with pressurized air. Gas-dynamic bearings are characterized by the backing of various designs, which provides performance rotors for starting and stopping. The main problem of this type of bearing, in addition to the complexity of design, is the limited durability of the backing layer. Bearing using pressurized air has no such defect, since physical contact between solid surfaces are missing. This article consists calculation results of the hybrid bearing, which combines both of the technologies. The dependences of the main parameters of the rotation speed of the shaft are considered as well as aerodynamic resistance of pads for different modes of operation.

**Keywords:** bearing using pressurized air, gas-dynamic bearing, hybrid bearing, hybrid bearing pad

В течение нескольких последних десятилетий в ряде стран мира активно разрабатываются подшипники на газовой смазке. Получен достаточный опыт создания подобных устройств небольших размеров. К сожалению, влияние масштабного фактора не позволяет непосредственно использовать данный опыт при проектировании опор крупных роторов. Главной технической задачей, которую приходится решать при применении газовых подшипников, является обеспечение высокой эксплуатационной надежности работы в условиях вибраций и перегрузок, существенное повышение грузоподъемности подшипников.

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 взаимодействия движущихся частей вала и подшипника с вязким тонким слоем), а также гибридные (имеют место оба эффекта). Газодинамические (ГДП) опоры

применяются в малоразмерных высокооборотных роторных машинах и характеризуются наличием поддерживающего слоя различных конструкций в виде сотовых вставок или свёрнутых лент, лепестков, которые обеспечивают работоспособность роторов на запуске и торможении. Помимо высокой технологической сложности подобной конструкции, требующей для обеспечения пожаробезопасности использования специальных материалов, существует проблема снижения ресурса при старте и торможении ротора. ГДП создаёт достаточную подъёмную силу только при достижении частоты вращения 20% от максимальной. До этого подшипник работает в режиме сухого трения. При каждом 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. Однако главный их недостаток – небольшая грузоподъемность. Максимальный вес известных роторов на

газодинамических опорах не превышает 20 кг, ресурс 30–40 тыс. часов. Газостатические подшипники (ГСП) свободны от указанных недостатков, т.к. физический контакт твердых поверхностей между собой вообще отсутствует, а грузоподъемность зависит только от давления подаваемого воздуха. Таким образом, повышенный расход воздуха в ГСП удачно компенсируется абсолютной пожаробезопасностью, а также ресурсом, не зависящим от числа стартов и торможений.

Последнее объясняется тем, что подъемная сила, создаваемая поддувом газа под давлением, слабо зависит от частоты вращения вала. Вал может вывешиваться на воздушном подвесе, а уже затем раскручиваться. При торможении скорость вращения может быть погашена до 0, после чего вал можно опустить на опору путём уменьшения давления поддува.

### Технология гибридного ГСП

На современном этапе развития аэрокосмической техники ведется разработка принципиально новых комбинированных воздушно-реактивных двигателей, которым приходится работать в широком диапазоне параметров [3]. Особые требования предъявляются к конструкции узлов трансмиссий таких моторов. Желательным является исключение из состава трансмиссий систем масляной смазки. Одним из перспективных направлений работ в данной сфере считается разработка бесконтактных подвесов роторов турбомашин [1].

Принцип работы классического газостатического подшипника рассмотрен в работе [5]. В ряде работ предлагается использовать вкладыши, один край которых не закреплён и может перемещаться под воздействием сил давления. В результате того, что вкладыш разворачивается вокруг закреплённой оси, его поверхность оказывается под углом атаки к набегающему потоку (рис. 1). Это создаёт аэродинамическую силу.

Сила тем больше, чем выше скорость вращения. Такие подшипники называются гибридными с самоустанавливающимися вкладышами. При больших скоростях вращения вала их работа подобна многоклиновому ГДП. Перемещение вала приводит к изменению нагрузки на вкладыши, в результате чего они поворачиваются на некоторый угол, что, в свою очередь, приводит к изменению давления в соответствующих областях смазочного слоя. Таким образом, ГСП с самоустанавливающимися вкладышами имеют определенный диапазон саморегулирования, что снижает требования к системе управления. На рис. 2 представ-

лена схема колодки, расчет которой производился. Колодка закрепляется в центре шарнира и имеет возможность вращаться относительно него. Примеры расчета лопастевых газовых подшипников, постановку задачи можно увидеть в работе [2].

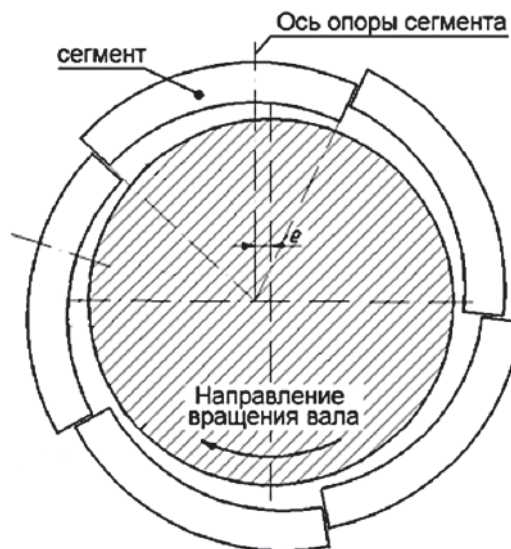


Рис. 1. Корпус опоры с установкой пяти колодок на сферических шарнирах,  $e$  – эксцентриситет сегмента

### Расчет гибридного трехлепесткового ГСП

Постановка задачи состоит в следующем. Необходимо исследовать зависимость параметров самоустанавливающегося вкладыша ГСП от скорости вращения вала при фиксированном угле установки вкладыша к поверхности вала.

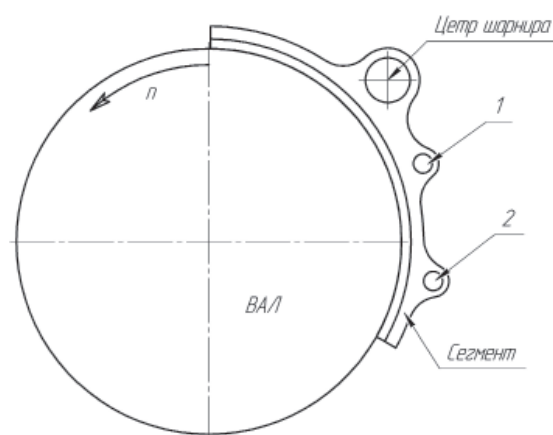


Рис. 2. Схема колодки

Исходные данные:

- Средний зазор (по плоскости, соединяющей оси вращения вала и шарнира) 20 мкм, выходной зазор – 10 мкм.

- Давление по контуру сегмента равно атмосферному.

- Давление в подводящих каналах – 0,4 МПа.

- Скорость вращения вала: 3000, 6000, 12000, 24000 об./мин.

- 3D-модель представлена на рис. 3. Колодки отличаются размерами подводящей системы и соплами. Колодка № 1 имеет прямое щелевое сопло 1 и криволинейное щелевое сопло 2 одинаковой ширины – 2 мм. Диаметр подводящего дросселя – 1 мм. У колодки № 2 ширина прямого щелевого сопла – 2,8 мм, ширина криволинейного щелевого сопла – 2 мм, диаметры дросселей – 2 и 1,6 мм соответственно.

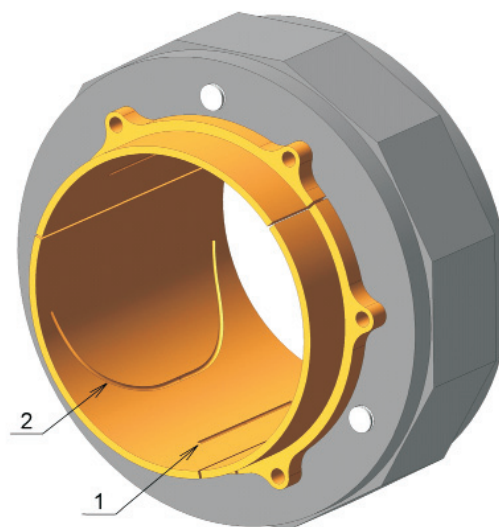


Рис. 3. Трехмерная модель ГСП с самоустанавливающимися вкладышами

#### Результаты исследования сходимости и распределения давления в зависимости от скорости вращения вала

Результаты расчетов в зависимости от скорости вращения вала представлены на рис. 4–5.

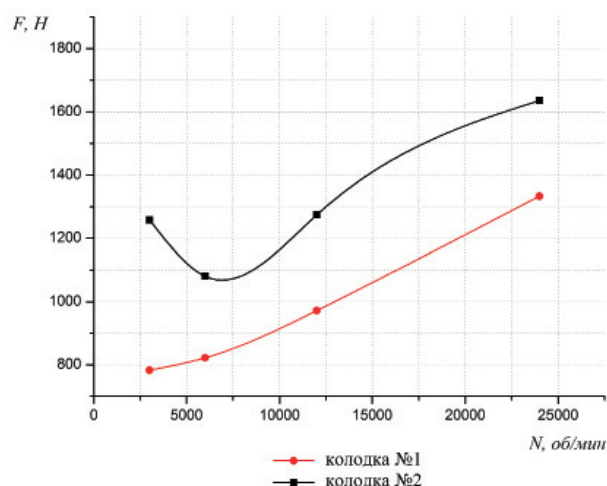


Рис. 4. Зависимость равнодействующей силы давления, проходящей через центр вращения вала и центр вращения шарнира, от частоты вращения вала

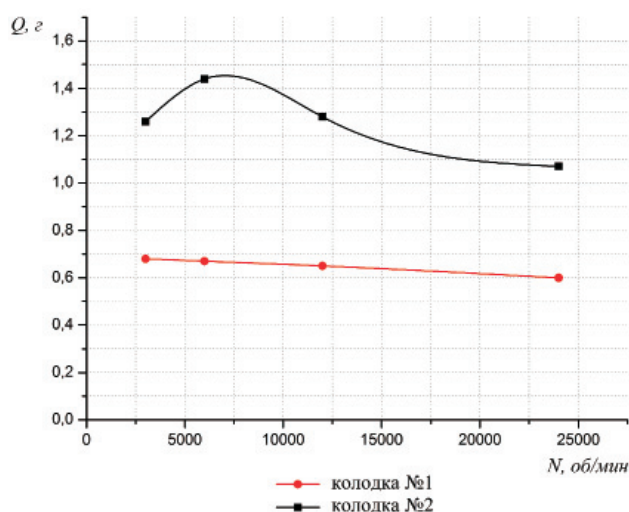


Рис. 5. Зависимость расхода газа от частоты вращения вала

Большее значение грузоподъемности второй колодки объясняется большим расходом газа через дроссели.

**Зависимость момента на колодке от частоты вращения вала**

Согласно схеме, представленной на рис. 2, положительное значение главного момента сил давления, действующих на колодку, принято для вращения колодки по часовой стрелке, отрицательное – против. На

рис. 6 видно, что на малых скоростях вращения момент сил давления стремится развернуть колодку в сторону увеличения угла атаки. На больших скоростях знак момента меняется. Таким образом, установленный с незакрепленной осью вращения вкладыш обладает определенным диапазоном саморегулирования благодаря изменению угла атаки в зависимости от частоты вращения.

Результаты расчета колодок сведены в таблицу.

Результаты расчетов

	Расчетная область с зазором 1 мм				Расчетная область с зазором 2 мм			
	3000	6000	12000	24000	3000	6000	12000	24000
Частота оборотов вала, об/мин	3000	6000	12000	24000	3000	6000	12000	24000
Расход газа $Q$ , г	0,68	0,67	0,65	0,60	1,26	1,44	1,28	1,07
Момент относительно шарнира $M$ , Н·м	2,629	2,654	0,498	-6,242	10,518	12,637	10,200	0,190
Сила давления вдоль оси, проходящей через центр вращения вала и центр вращения шарнира $F_{ш}$ , Н	782	822	972	1333	1258	1080	1274	1636
Главный вектор сил давления $F$ , Н	772	811	952	1287	1260	1092	1275	1601

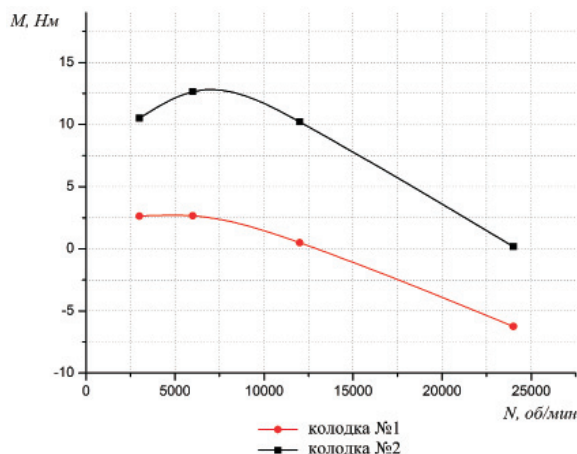


Рис. 6. Зависимость главного момента относительно шарнира от частоты вращения вала

**Список литературы**

1. Бесчастных В.Н., Равикович Ю.А. Газовый подшипник тяжелого ротора газотурбинных двигателей. Опыт разработки и перспективы внедрения // Вестник МАИ. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 84–94.
2. Бесчастных В.Н., Равикович Ю.А. Определение статической грузоподъемности сегментного газостатического подшипника // Вестник МАИ. – 2009. – Т.16, № 1. – С. 91–98.
3. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Особенности применения моделей турбулентности при расчете течений в сверхзвуковых трактах перспективных воздушно-реактивных двигателей // Двигатель. – 2012. – № 1. – С. 20–23.
4. Листопадов И.В., Шершнев Б.Б. Моделирование сегментного газового подшипника // ANSYS Solutions. Русская редакция. – 2006. – С. 43–45.
5. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи // Вестник МАХ. – 2012. – № 3. – С. 3–7.

**References**

1. Beschastnyh V.N., Ravikovich Ju.A. Gazovyy podshpinnik tjazhelogo rotora gazoturbinnyh dvigatelej. Opyt razrabotki i perspektivy vnedrenija. Vestnik MAI. t.17, 2010, no. 3, pp. 84–94.
2. Beschastnyh V.N., Ravikovich Ju.A. Opredelenie staticheskoj gruzopodemnosti segmentnogo gazostaticheskogo podshpinnika. Vestnik MAI. t.16, 2009, no. 1, pp. 91–98.
3. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V. Osobennosti primeneniya modelej turbulentsnosti pri raschete techenij v sverhzvukovyh traktah perspektivnyh vozdušno-reaktivnyh dvigatelej. Dvigatel'. no. 1, 2012, pp. 20–23.
4. Listopadov I.V., Shershnev B.B. Modelirovanie segmentnogo gazovogo podshpinnika. ANSYS Solutions. Russkaja redakcija. Zima 2006, pp. 43–45.
5. Uskov V.N., Bulat P.V. Ob issledovanii kolebatel'nogo dvizhenija gazovogo podvesa rotora turboholodil'nyh i detandernyh mashin. Chast' I. Postanovka zadachi. VESTNIK MAH, no. 3, 2012, pp. 3–7.

hvizkovykh traktah perspektivnyh vozdušno-reaktivnyh dvigatelej. Dvigatel'. no. 1, 2012, pp. 20–23.

4. Listopadov I.V., Shershnev B.B. Modelirovanie segmentnogo gazovogo podshpinnika. ANSYS Solutions. Russkaja redakcija. Zima 2006, pp. 43–45.

5. Uskov V.N., Bulat P.V. Ob issledovanii kolebatel'nogo dvizhenija gazovogo podvesa rotora turboholodil'nyh i detandernyh mashin. Chast' I. Postanovka zadachi. VESTNIK MAH, no. 3, 2012, pp. 3–7.

**Рецензенты:**

Баранов И.В., д.т.н., профессор, заместитель директора Института холода и биотехнологий ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург;

Пеленко В.В., д.т.н., профессор, заместитель директора по учебной работе Института холода и биотехнологий ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 08.02.2013.