

УДК 531.8, 628.1

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОМЕНТОВ НА СВОБОДНО ПОВОРАЧИВАЮЩИХСЯ СЕГМЕНТАХ ГИБРИДНОГО ВОЗДУШНОГО ПОДШИПНИКА

METHOD OF CALCULATION TORQUE ON THE FREELY ROTATABLE SEGMENTS OF THE HYBRID AIR BEARING

Ильина Тамара Евгеньевна

аспирант кафедры Холодильных машин и низкпотенциальной энергетики.

Университет ИТМО

Тел.: +7(911) 138-91-15

Tamara.e.ilina@gmail.com

Бесчастных Владимир Николаевич

кандидат технических наук, главный конструктор.

ООО «ЦТТ «Кулон»

Тел.: +7(812) 680-17-08

vbes2@yandex.ru

Ilina Tamara Evgenevna

Postgraduate student, the Faculty of Refrigerating machines and low potential energy.

ITMO University

Ph.: +7(911) 138-91-15

Tamara.e.ilina@gmail.com

Beschastnyih Vladimir Nikolaevich

Candidate of engineering, chief designer.

TTC «Kulon» Ltd

Тел.: +7(812) 680-17-08

Ph.: vbes2@yandex.ru

Аннотация. Целью данной работы является подробное описание методики определения моментов на свободно поворачивающемся сегменте гибридного воздушного подшипника. В статье коротко рассмотрены типы существующих газовых подшипников и их принцип действия. Показана необходимость в расчете равновесного положения сегмента. Приведен пример расчета равновесного положения и равнодействующей силы действующей на сегмент.

Ключевые слова: газовый подшипник, гибридный газовый подшипник, устойчивое положение сегмента, крутящий момент.

Annotation. In this paper detailed description of method for determining the torque on freely rotating segment of the hybrid air bearing is given. The paper contains a brief description of the types of existing gas bearings and their operating principle. Necessity for calculating the equilibrium position of segment is shown. Example calculation of the equilibrium position and the resultant force acting on the segment is shown.

Keywords: gas bearing, hybrid gas bearing, steady position of segment, torque.

Постановка задачи

В последние годы существенно возрос интерес к подшипникам скольжения на газовой смазке. Использование газовых подшипников связано с повышением эффективности двигателей различного назначения, газотурбинных энергетических машин, турбохолодильных агрегатов [1].

Проблеме подшипников на газовой смазке посвящены фундаментальные труды Шейнберга [2] и Константинеску [3], Риппела [4], Грессема и Пауэлла [5]. А так же работы Котляра [6], Заблоцкого [7], Лойцянского и Степанянца [8], [9], [10].

Различают газостатические (ГСП), газодинамические (ГДП) и гибридные подшипники [11], которые отличаются принципом создания подъемной силы.

В газодинамических подшипниках подъемная сила создается за счет взаимодействия движущихся частей вала и подшипника с вязким тонким слоем. Эксплуатация таких подшипников на высокооборотных машинах связана с большим риском износа твердых смазывающих покрытий в условиях высоких температур, что может привести к пожару. Однако главный их недостаток – небольшая грузоподъемность, ограниченная подъемной силой, создаваемой за счет эффекта Бернулли.

Газостатические подшипники для создания подъемной силы требуют постоянной подачи рабочего газа в зазор между корпусом подшипника и ротором и поэтому являются неэкономичными. Помимо этого для ГСП характерно наличие различных колебательных режимов связанных с рассогласованием расхода газа, поступающего в смазочный зазор и истекающего из него [12, 13].

Наиболее перспективными являются гибридные подшипники [14], совмещающие оба принципа создания подъемной силы. Гибридные подшипники требуют подачи рабочего газа лишь в моменты пуска и останова ротора, в остальное время они работают по принципу газодинамических подшипников.

Наличие сразу двух принципов создания подъемной силы в гибридном подшипнике обусловлено применением в конструкции подшипника самоустанавливающихся сегментов (колодок), которые крепятся к корпусу посредством сферического шарнира (рис. 1).

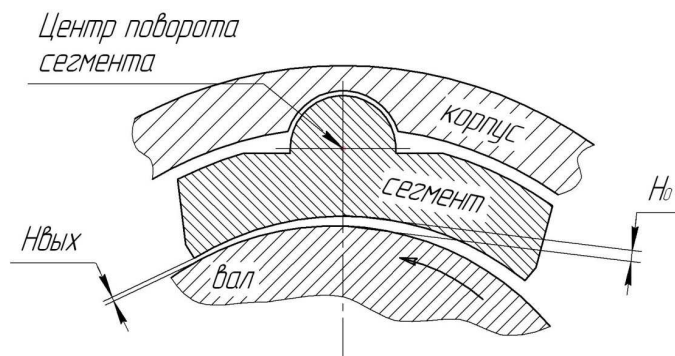


Рисунок 1 – Схема расположения сегмента и вала

Конструкция корпуса гибридного подшипника такова, что каждая колодка со сферическим шарниром является самоустанавливающейся, т.е. под воздействием перепада давления и разворачивающего момента она устанавливается на определенный угол по отношению к поверхности вала. При отсутствии нагрузки и вращения вала сегменты располагаются эквидистантно поверхности вала.

Под действием внешней силы вал смещается относительно центра опоры. В результате средние зазоры на сегментах становятся разными. В том месте, где имеется минимальный зазор, возникают наибольшие силы давления в смазочном слое. Наоборот, в месте наибольшего зазора возникают наименьшие силы. В результате векторного сложения сил от всех сегментов возникает суммарная реакция подшипника, компенсирующая внешнюю силу.

Шарнир позволяет сегментам поворачиваться под действием газовых сил и занимать положение равновесия, при котором крутящий момент становится равным нулю.

Одной из задач проектирования гибридного газового подшипника является нахождение такого расположения оси вращения, которое будет обеспечивать устойчивое положение сегмента, когда при изменении частоты вращения сегмент самостоятельно поворачивается на заданный угол и сохраняет устойчиво это положение. Для этого необходимо уметь рассчитывать силы и моменты на свободно поворачивающемся сегменте гибридного воздушного подшипника.

Методика расчета

В соответствии с принципом определения равновесного положения сегмента, сформулированного в [15], опишем более подробно методику расчета устойчивого положения сегментов:

Для выбранной геометрии сегмента подшипника задается зазор между валом и сегментом H_0 в месте расположения шарнира.

Для выбранных параметров создаются 3-D модели с разной клиновидностью зазора – с разным значением $H_{вых}$ (часто достаточно двух моделей для одного значения H_0).

После с использованием современных программных продуктов выполняется построение расчетной сетки и численный расчет течения в смазочном зазоре, в результате которого мы получаем: крутящий момент в центре вращения и равнодействующую силу давлений, действующие на сегмент.

Строим диаграммы сил и моментов в зависимости от выходного зазора для каждого текущего $H_{вых}$.

По этим диаграммам методом линейной интерполяции определяем выходной зазор (H_{op}), при котором наступает равновесное положение сегмента и равнодействующую сил давления ($F_{к0}$), действующую на сегмент в положении равновесия.

Результаты расчета и анализ

Проведем расчеты 3 типов сегментов газостатического подшипника:

- с контурным подводом газа через 3 ряда отверстий,
- с подводом газа через 3 продольные микроканавки,
- с подводом газа через поперечную микроканавку.

1. Выбираем значения H_0 для выбранных типов сегментов: 20, 30, 40, 50, 60 и 80 мкм.

2. Для каждого выбранного H_0 назначаем по 2 значения $H_{вых}$ и создаем модели с разной клиновидностью.

3. Выполняем построение расчетной сетки и газодинамические расчеты течения. В результате получаем: крутящий момент в центре вращения и равнодействующую силу давлений, действующие на сегмент. Результаты расчетов 3-х типов сегментов представлены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1 – Результаты расчета сегмента радиального подшипника с контурным поддувом газа через кольцевые сопла

Средний зазор H_0 , мкм	20		30		40		50		60		80	
Выходной зазор $H_{вых}$, мкм	10	15	10	20	10	20	10	20	15	30	20	40
Момент в шарнире M_z , Нм	-5,76	5,87	-7,27	1,03	-7,62	0,46	-7,72	-1,7	-4,32	0,01	-2,75	1,08
Равнодействующая сил давления, Н	1901	1804	1512	1373	1172	1103	946	880	695	689	523	493

Таблица 2 – Результаты расчета сегмента радиального подшипника с поддувом газа через три продольные микроканавки

Средний зазор H_0 , мкм	20		30		40		50		60		80	
Выходной зазор $H_{вых}$, мкм	10	15	10	20	10	20	10	20	15	30	20	40
Момент в шарнире M_z , Нм	-5,41	0,33	-6,5	1,03	-7,81	-0,3	-7,84	-2,18	-3,9	0,04	-2,7	0,78
Равнодействующая сил давления, Н	2468	2195	2057	1893	1401	1321	986	857	574	574	301	261

Таблица 3 – Результаты расчета сегмента радиального подшипника с поддувом газа через поперечную микроканавку

Средний зазор H_0 , мкм	20		30		40		50		60		80	
Выходной зазор $H_{вых}$, мкм	10	15	10	20	10	20	10	20	15	30	20	40
Момент в шарнире M_z , Нм	-14,0	0,6	-12,5	1,3	-6,1	1,0	0,78	3,4	-2,72	-0,27	-2	0,25
Равнодействующая сил давления, Н	2959	2578	1699	1345	932	749	491	458	342	298	156	103

4. По данным таблицы 1, 2, 3 для каждого текущего зазора H_0 строим диаграммы моментов и сил в зависимости от выходного зазора (рис. 2–7). На диаграммах приведены значения для всех 3-х сегментов, числовые значения, приведенные на диаграммах относятся к сегменту с подводом газа через 3 продольные микроканавки.

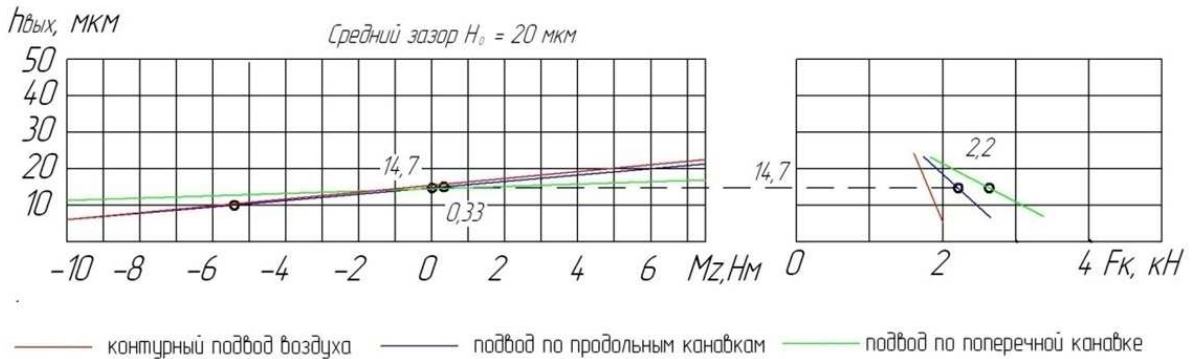


Рисунок 2 – Диаграммы моментов и сил для $H_0 = 20$ мкм

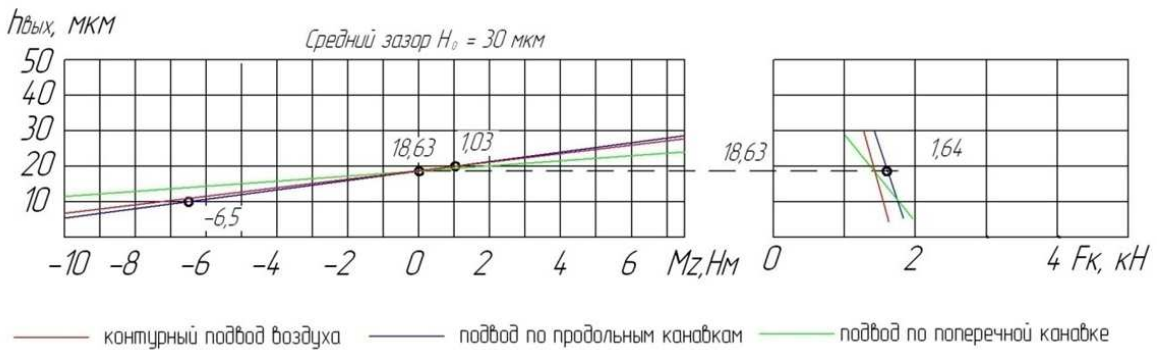


Рисунок 3 – Диаграммы моментов и сил для $H_0 = 30$ мкм

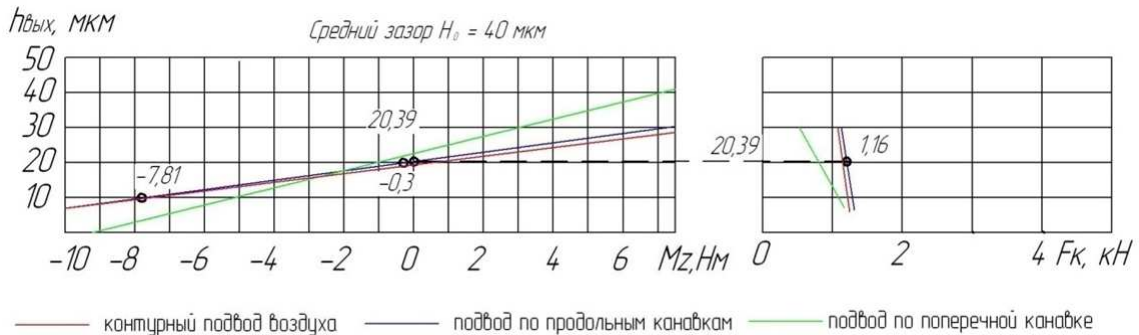


Рисунок 4 – Диаграммы моментов и сил для $H_0 = 40$ мкм

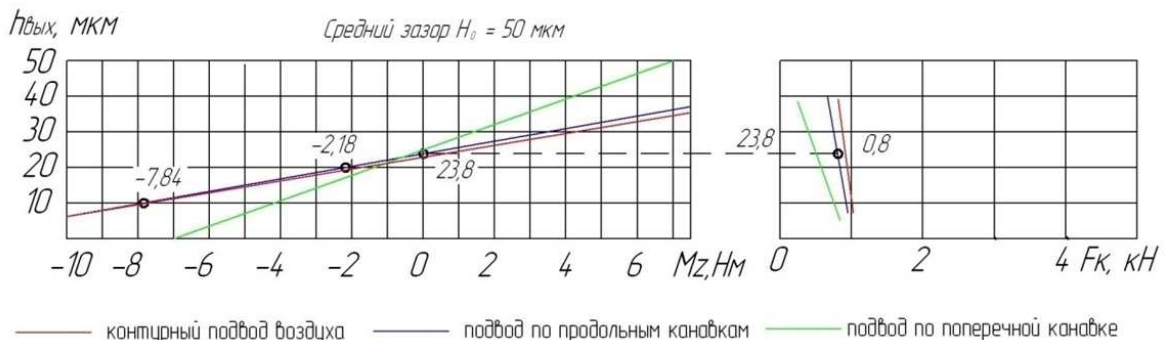


Рисунок 5 – Диаграммы моментов и сил для $H_0 = 50$ мкм

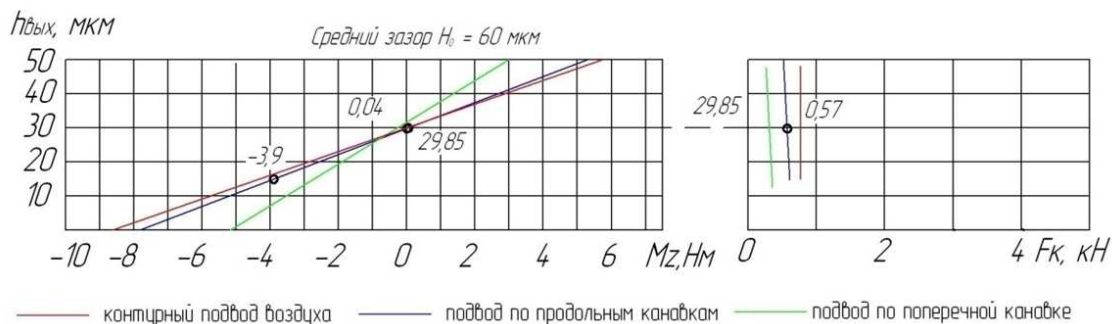


Рисунок 6 – Диаграммы моментов и сил для $H_0 = 60$ мкм

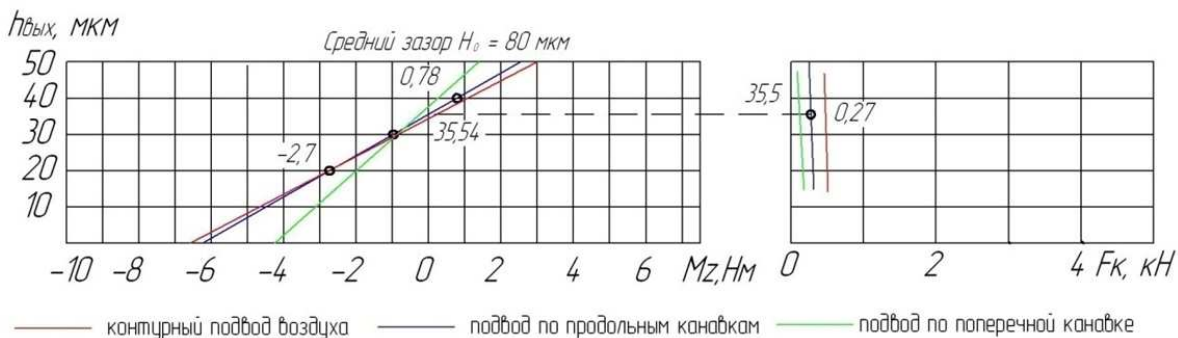


Рисунок 7 – Диаграммы моментов и сил для $H_0 = 80$ мкм

5. Далее по этим диаграммам методом линейной интерполяции определяем выходной зазор ($H_{ор}$), при котором наступает равновесное положение сегмента и равнодействующую сил давления ($F_{к0}$), действующую на сегмент в положении равновесия. Полученные данные с диаграмм представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Равнодействующая сила давления и выходной зазор в равновесном положении

Зазор в месте расположения шарнира H_0 , мкм		20	30	40	50	60	80
Равнодействующая сил давления, Н	Контурный подвод	1798	1396	1102	861	682	504
	Продольные канавки	2242	1643	1160	812	574	270
	Поперечная канавка	2618	1368	796	511	306	101
Выходной зазор $H_{вых}$, мкм	Контурный подвод	14,7	18,6	20,4	23,8	29,8	35,4
	Продольные канавки	14,7	18,6	20,4	23,8	29,9	35,5
	Поперечная канавка	14,7	18,6	23,99	25,1	32,2	37,4

Заключение

Описан принцип работы гибридного газового подшипника, на основе которой показана необходимость в расчете равновесного положения сегмента. Подробно описана методика определения сил и моментов. Данная методика позволяет определить равновесное положение сегмента, а также в конечном итоге получить равнодействующую силу, действующую на сегмент в положении равновесия.

Литература:

- Смирнова О.С., Булат П.В., Продан Н.В. Применение управляемых газо- и гидростатических подшипников в турбонасосных агрегатах многоразовых комбинированных ЖРД.
- Опоры скольжения с газовой смазкой / Под ред. С.А. Шейнберга. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 336 с.

3. Constantinescu V.N. Lubrificatia cu gaze. – Bucuresti, 1963.
4. Проектирование гидростатических подшипников / Под ред. Гарри Риппела. Перевод с английского Г.А. Андреевой. – М. : Машиностроение, 1967, – 135 с.
5. Подшипники с газовой смазкой / Под ред. Н.С. Грессема., Дж.У. Пауэлла. – М. : Мир, 1966. – 415 с.
6. Котляр Я.М. Асимптотические решения уравнения Рейнольдса // Механика жидкости и газа. – 1967. – № 1. – С. 161.
7. Заблоцкий Н.Д., Карякин В.Е., Спиенков И.Е. Сферический газовый подшипник с принудительным наддувом // Механика жидкости и газа. – 1970. – № 3. – С. 147–154.
8. Лойцыанский Л.Г., Степанянец Л.Г. Гидродинамическая теория сферического подвеса // Труды ЛПИ. – 1958. – № 198. – С. 89–98.
9. Заблоцкий Н.Д. Линеаризация граничных условий в теории воздушных подвесов // Труды ЛПИ. – 1961. – № 217. – С. 127–132.
10. Степанянец Л.Г. Некоторые методы газодинамической теории смазки // Труды ЛПИ. – 1967. – № 280. – С. 27–43.
11. Bulat M.P. Bulat P.V. Basic classification of the gas-lubricated bearings // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 28 (10). – P. 1444–1448.
12. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи.
13. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы.
14. П.В. Булат. Практика проектирования газовых подшипников для холодильных машин. Часть I. Обзор газовых подшипников // Холодильная техника. – 2015. – № 8. – С. 2–6.
15. В.Н. Бесчастных, П.В. Булат. Практика проектирования газовых подшипников для холодильных машин. Часть II. Проектирование и методика расчета гибридных подшипников // Холодильная техника. – 2015. – № 8. – С. 17–20.

References:

1. 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.
2. Sliding support with gas greasing / Under the editorship of S.A. Sheynberg. – 2nd prod., reslave. and additional. – М. : Mechanical engineering, 1979. – 336 p.
3. Constantinescu V.N. Lubrificatia cu gaze. – Bucuresti, 1963.
4. Design of hydrostatic bearings / Under the editorship of Harry Rippel. Translation from G.A. Andreyeva's English. – М. : Mechanical engineering, 1967. – 135 p.
5. Bearings with gas greasing / Under the editorship of N.S. Gressema., J.U. Powell. – М. : World, 1966. – 415 p.
6. Kotlyar Ya.M. Asymptotic solutions of the equation of Reynolds // Mechanics of liquid and gas. – 1967. – № 1. – P. 161.
7. Zablotsky N.D., Karyakin V.E., Spiyenkov I.E. Sferichesky the gas bearing with compulsory pressurization // Mechanics of liquid and gas. – 1970. – № 3. – P. 147–154.
8. Loytsyansky L.G., Stepanyants L.G. Hidrodinamicheskaya theory of spherical subweight // Works LPI. – 1958. – № 198. – P. 89–98.
9. Zablotsky N.D. Linearization of boundary conditions in the theory of air subscales // Works of LPI. – 1961. – № 217. – P. 127–132.
10. Stepanyants L.G. Some methods of the gasdynamic theory of greasing // Works LPI. – 1967. – № 280. – P. 27–43.
11. Bulat M.P., Bulat P.V. Basic classification of the gas-lubricated bearings // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 28 (10). – P. 1444–1448.
12. Uskov V.N., Bulat P.V. About research of an oscillating motion of gas subweight of a rotor turbo-refrigerator and the detandernykh of cars. Part I. Problem definition.
13. Uskov V.N., Bulat P.V. 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.
14. P.V. Bulat. Practice of design of gas bearings for refrigerators. Part I. Review of gas bearings // Refrigerating equipment. – 2015. – № 8. – P. 2–6.
15. V.N. Beschastnykh, P.V. Bulat. 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.