

УДК 533.2+534.14, 67.05

Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин.

Часть I. Постановка задачи

В. Н. УСКОВ*БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Маршала Д. Ф. Устинова
190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1***П. В. БУЛАТ***ООО «Проблемная лаборатория “Турбомашины”»
198035, Санкт-Петербург, ул. Степана Разина, 7/78*

The task of creating designs gas bearings with gasfed, substantially greater than the existing gas-dynamic flap and foil bearings, both on duty and on the resource, the frequency of rotation of the shaft, and other performance characteristics. The results of investigation of the vibrational modes of motion of the rotor, the causes, mechanisms, and the amplitude-frequency characteristics of pressure fluctuations in the supply system of the working fluid and the lubricating layer of the gas bearing.

Keywords: gas bearings with gasfed, hybrid gas bearing, the critical frequency, the Reynolds equation, mode air hammer, flow rate fluctuations.

Ключевые слова: газостатический подшипник, гибридный газовый подшипник, критическая частота, уравнение Рейнольдса, режим «пневмомолоток», расходные колебания.

Введение

Одним из направлений повышения надежности и увеличения ресурса работы вращающихся машин является применение бесконтактных опор различной конструкции, которые обеспечивают вращение и стабилизацию пространственного положения роторов без непосредственного контакта металлических частей. Отсутствие контакта на рабочих режимах, а следовательно, контактного трения, отсутствие необходимости в смазке, возможность обеспечения высоких частот вращения, относительная простота и малый вес конструкции делают такие опоры весьма привлекательными для тех отраслей техники, где требуется продолжительная и надежная работа без обслуживания, легкость и компактность.

Создание таких подшипников позволит радикально упростить трансмиссии ряда устройств (турбохолодильных агрегатов и машин, детандеров, газотурбинных двигателей, компрессоров, насосов, вентиляторов), исключив систему смазки, при одновременном увеличении ресурса трансмиссий этих устройств.

Основные преимущества газовых подшипников по сравнению с опорами качения, электромагнитными и гидростатическими подшипниками заключаются в следующем:

- способны работать при высоких и низких температурах и влажности;
- обеспечивают надежную и долговечную работу узлов трения;
- обладают стойкостью против радиационного облучения;
- не загрязняют окружающую среду;
- существенно упрощают конструкцию узла трения;

— обеспечивают низкий уровень вибрации и шума.

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.

Достижения в этой области определили коммерческий успех энергетических кластеров газовых микротурбин фирмы CAPSTONE, которая реализовала на рынке более 2500 установок с газодинамическими подшипниками. Основные исследования для CAPSTONE были выполнены в NASA Lewis Research Center [1].

К числу отечественных достижений можно отнести применение газовых лепестковых подшипников в разработанной фирмой «Наука» системе кондиционирования для самолетов Ту-134/234, а также для железнодорожного транспорта.

В настоящее время определилось несколько областей техники, в которых применение подшипников на газовой смазке считается целесообразным:

- для топливно-энергетического комплекса страны, в частности для замены масляной системы опор газоперекачивающих агрегатов и насосных станций нефтепроводов, а также автономных энергоблоков;
- вторым по важности является рынок криогенной техники и турбохолодильных агрегатов;
- третьим по емкости является рынок авиационных газотурбинных установок.

Перспективным является применение бесконтактных подшипников на газовой смазке в турбохолодильных агрегатах (ТХА) и газоразде-

лительных установках (детандерах). В этих случаях важным является отсутствие загрязнения газов и продуктов охлаждения масляной смазкой.

Электромагнитные опоры нуждаются в высокоскоростных электронных системах управления, чувствительны к качеству электропитания и электромагнитным помехам, имеют нестабильные свойства при изменении температуры окружающей среды, требуют точного изготовления сложных конструкций. Их жесткость в несколько раз ниже, чем у подшипников на газовой смазке, т.е. для создания одинаковой поддерживающей силы электромагнитные подшипники требуют в несколько раз больших затрат энергии. Рассмотрим бесконтактные подшипники на газовой смазке, а также возникновение нестационарных режимов их работы.

Газовые подшипники и турбохолодильные агрегаты

Обострение экологической обстановки, связанное с разрушением озонового слоя земли, 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. К достоинствам воздуха как хладагента относятся его доступность, нетоксичность, пожаровзрывобезопасность, возможность применения для непосредственного охлаждения продуктов. Установки с воздушным холодильным циклом способны работать в диапазоне температур от комнатных до температуры жидкого воздуха. Воздух имеет нулевые потенциалы разрушения озонового слоя и глобального потепления и полностью отвечает всем требованиям Монреальского и Киотского протоколов по экологической безопасности. Турбохолодильные агрегаты представляют собой высокооборотные турбины на газовых подшипниках. На смазку подшипников подается тот же воздух, который идет на расширение в турбину. Одновременно с холодом установки производят высокопотенциальное тепло, которое можно использовать в производственных целях.

ТХА предназначены для работы:

- в системах шоковой заморозки рыбы, морепродуктов, мясных полуфабрикатов, овощей и фруктов, заправки мороженого;
- в технологических линиях низкотемпературной переработки резины, шин, пластмасс, минерального сырья и т. п.;
- в составе установок переработки попутных и факельных газов и установок низкотемпературной очистки опасных газовых выбросов.

Также ТХА могут использоваться для:

- комплектации низкотемпературных испытательных камер;
- охлаждения низкотемпературных хладонотителей.

Турбодетандерные агрегаты на газостатических опорах

Этот тип турбоагрегатов используется в установках разделения воздуха. Особенностью турбоагрегата является то, что вместо масляной системы смазки подшипников используется рабочий газ. Такая конструкция имеет ряд преимуществ: гарантируется чистота потока газа, упрощается эксплуатация и повышается надежность агрегата. Известное ограничение размерности обычных газовых подшипников не позволяет увеличивать производительность. По расходу рабочего газа агрегаты на газовых опорах уступают классическим турбодетандерам на порядок. Применение газостатического управляемого подшипника (ГСП) с принудительной подачей рабочего тела в зазор между статором и ротором позволяет снять ограничение на грузоподъемность и производительность турбомашин.

Газовые подшипники — предметная область

Возможность использования воздуха в качестве смазочного вещества была проверена Хирном, Кинсбери, Гаррисоном, а более полное исследование цилиндрических опор скольжения с газовой смазкой было проведено С. А. Штейнбергом в 1953 г. [2], а также на кафедре механики и математики ЛПИ под руководством Л. Г. Лойцянского — основоположника школы газовой динамики [3]. Кафедра ЛПИ занималась разработкой теории гироскопов на газовом подвесе, а также газостатических узлов для точной выверки приборов.

По принципу создания подъемной силы, все подшипники делятся на *газостатические* (подъемная сила создается подаваемым внешним устройством под избыточным давлением воздуха), *газодинамические* (подъемная сила создается за счет взаимодействия движущихся частей вала и подшипника с вязким тонким слоем), а также *гибридные* (имеют место оба эффекта).

Конструкции газовых подшипников, как правило, не подлежат масштабированию, т.к. силы давления, определяющие грузоподъемность при изменении линейных размеров, пропорциональны их квадрату, а массовые силы — кубу. Именно поэтому, широко распространены небольшие высокооборотные ГСП с диаметром вала в несколько миллиметров, успешно работающие, на частотах вращения до 300 000 об/мин, а также ГДП с диаметром вала до нескольких десятков миллиметров. Увеличение диаметра приводит к необходимости задавать значительно большее давление в зазоре и, как следствие, больший расход рабочего газа. Это сказывается на экономичности. Действует известный парадокс «квадрата—куба».

Накопленный опыт использования бесконтактных высокоскоростных подшипников показывает, что в небольших устройствах, маломощных ТХА и детандерах преимущественное применение нашли лепестковые газодинамические подшипники, являющиеся разновидностью газодинами-

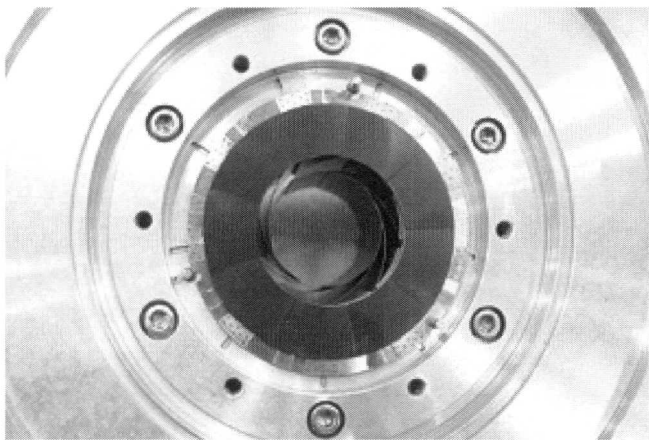


Рис. 1. Газодинамический подшипник

ческих опор. Несущий газовый слой в таких подшипниках образован деформируемыми рабочими поверхностями — лепестками (рис. 1).

Газодинамические опоры характеризуются наличием поддерживающего слоя различных конструкций, в виде сотовых вставок или свернутых лент, лепестков, которые обеспечивают работоспособность роторов на запуске и останове.

Эксплуатация как лепестковых, так и фольговых подшипников на высокооборотных механизмах 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 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, независящим от числа стартов и торможений.

Последнее объясняется тем, что подъемная сила, создаваемая поддувом газа под давлением, слабо зависит от частоты вращения вала. Вал мо-

жет вывешиваться на воздушном подвесе, а уже затем раскрываться.

Преимущества и недостатки различных видов газовых подшипников приведены в табл. 1.

Система подачи рабочего тела ГСП может состоять из различного сочетания подводящих каналов, цилиндрических отверстий, щелевых сопел, карманов (поднутрений) и полостей (рис. 2, 3).

Нестационарные режимы работы газовых подшипников

Нестационарные процессы можно разделить на две большие группы: **колебательные и переходные**. Перемещение вала относительно геометрической оси может носить характер плоско-параллельного смещения, цилиндрического вращения центра масс ротора, а также конической прецессии.

Синхронные колебания вала могут возникать вследствие дисбаланса масс ротора. Существует проблема прохождения через критические частоты и области параметрического резонанса, когда частота вращения ротора совпадает с собственными частотами колебаний ротора, а также предотвращения явления «захвата частоты» (эффект Зоммерфельда) [4].

Известно также явление, получившее название «**полускоростной вихрь**», возникающее из-за потери устойчивости смазочного слоя, заключенного между двумя движущимися цилиндрическими поверхностями, в результате действия сил вязкого трения. Данное явление характерно для полноохватных газодинамических подшипников, но при больших частотах вращения возникает и в ГСП. Оно сопровождается прецессией ротора с частотой равной половине частоты вращения ротора вокруг своей оси.

Существует также еще один тип колебаний, получивший название «**пневмомолоток**». Пневмомолоток возникает в ГСП из-за мгновенной разности расхода газа, втекающего в смазочный зазор из питающих отверстий и расхода газа, истекающего из ГСП в окружающую среду. Данный режим

Таблица 1

Виды подшипников на газовой смазке

Газодинамический	Газостатический неуправляемый	Газостатический управляемый
Применяется в быстро вращающихся деталях малых размеров.	Применяется в гироскопах, координатных столах, измерительных приборах.	Пока не найдено применение из-за нерешенности проблемы быстрогодействия системы управления.
Недостаток: технологическая сложность изготовления, пожароопасность, малая несущая способность.	Преимущество: несущая способность зависит только от давления поддува и площади взаимодействия. Недостаток: плохая работа при нестационарных внешних воздействиях, ударах и т. п.	Потенциально идеальные легкие опоры для быстро вращающихся валов в условиях высоких температур, нестационарных внешних нагрузок и повышенных вибраций. Система управления должна обрабатывать «мертвую» зону зависимости перемещения вала от давления в зазоре и не допускать контакта неподвижных и вращающихся частей.

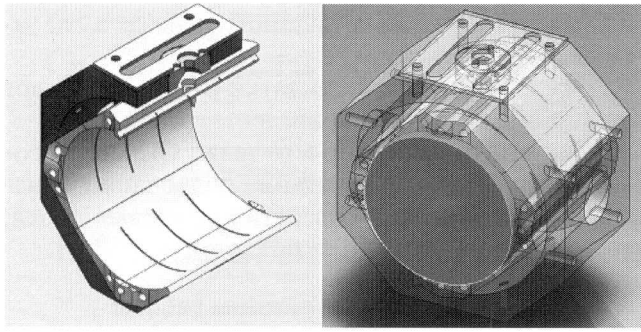


Рис. 2. Газостатический подшипник с подачей воздуха через систему щелевых сопел

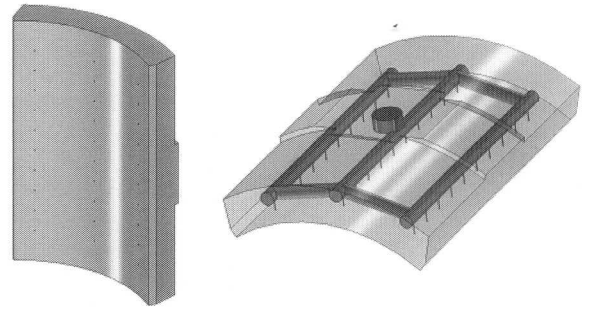


Рис. 3. Газостатический подшипник с подачей воздуха через систему цилиндрических отверстий

относится к типу релаксационных автоколебаний, он наиболее характерен для систем подачи газа с карманами. Именно изучению релаксационных колебаний ГСП посвящена настоящая работа.

Система управления ГСП должна парировать основные типы колебательных движений, обеспечивать регулирование расхода через дроссели, а также необходимую степень демпфирования при прохождении критически частот.

Релаксационные колебания давления и расхода в ГСП

При работе системы подачи газа в сверхкритическом режиме из отверстий в сопла и смазочный слой истекают сверхзвуковые струи, взаимодействующие с поверхностью цилиндра ротора (рис. 4).

С конца 50-х годов прошлого века автоколебательный режим в импактных сверхзвуковых струях активно изучается в коллективах, принадлежащих к различным газодинамическим школам России (ЦАГИ, БГТУ «ВОЕНМЕХ», ИТПМ СО РАН и др.). На основе многочисленных теоретических, экспериментальных и численных исследований выдвинуты различные гипотезы причин возникновения и механизмы поддержания этого режима [5, 6]. Однако многие аспекты явления до конца не выяснены и требуют дополнительных исследований.

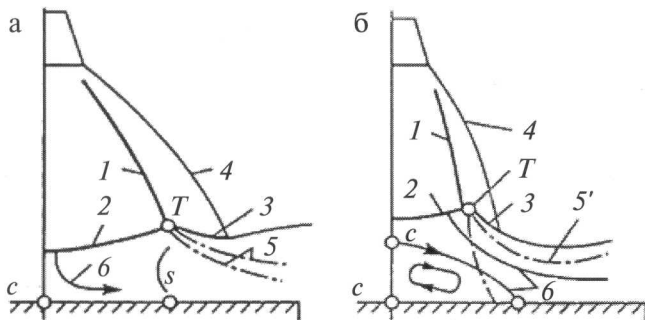


Рис. 4. Ударно-волновые картины перед преградой при натекании на нее сверхзвуковой струи:

а — стационарный режим обтекания; б — течение с центральной циркуляционной зоной; 1 — висчий скачок уплотнения; 2 — центральный скачок уплотнения; 3 — отраженный скачок; 4 — граница струи; 5 — зона смешения; 5' — звуковая линия; б — линия тока; с — точка торможения потока; s — звуковая точка; T — тройная конфигурация ударных волн

Автоколебательный режим взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой обусловлен неравномерным распределением параметров в струе, зависит от геометрических и газодинамических параметров сопла, размеров преграды и ее удаления от сопла. Существенное влияние на причины его возникновения и механизм поддержания оказывают параметры в тройных конфигурациях скачков уплотнения, а также цепи внутренней и внешней обратной связи.

Сопоставительный анализ результатов численного моделирования [7, 8] и приближенного расчета [9] указывает на то, что причина появления автоколебательного режима и механизм его поддержания определяются процессами, происходящими в ударном слое перед преградой. Распространение возмущений от преграды к центральному скачку уплотнения через центральный поток (канал обратной связи) и от скачков к преграде (канал прямой связи) являются теми каналами, через которые осуществляется поддержка автоколебаний.

Описанный выше механизм обладает значительной общностью с проблемой колебаний давления в циркуляционных зонах, возникающих в сверхзвуковых отрывных течениях [10, 11]. Сверхзвуковое сопло, установленное в цилиндрическом канале большего диаметра, может служить хорошей моделью более сложных случаев.

На докритических режимах работы ГСП, вследствие сильного вязко-невязкого взаимодействия потоков, истекающих в смазочный слой, может мгновенно образоваться неравенство расходов газа, поступающего в смазочный слой и истекающего через торцы ГСП. В этом случае происходит запираение течения в подводящих каналах и распространение восходящих волн сжатия навстречу потоку, что приводит к колебаниям. Хотя течение при этом чисто дозвуковое, сами закономерности колебательных процессов похожи на случай сверхкритического режима работы.

Умение управлять режимами колебаний позволяет увеличить грузоподъемность ГСП за счет использования положительной энергии колебательных процессов, либо избежать вредного явления «пневмомолоток».

Во второй части статьи будут приведены результаты теоретического и экспериментального исследования релаксационных колебаний ГСП.

Список литературы

1. A test stand for dynamic characterization of oil-free bearing for modern gas turbine engines/E. E. Swanson, J. F. Walton, H. Heshman // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002 June 3–6. 2002. Amsterdam, Netherland (GT-2002).

2. Шейнберг С. А. Опоры скольжения с газовой смазкой. — М: Машиностроение, 1969.

3. Заблочкий Н. Д., Сипенков И. Е., Филипов А. Ю. К 50-летию школы газовой смазки Л. Г. Лойцянского // Научно технические ведомости. Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»). 2004. № 2.

4. Sommerfeld A. Beitrage zum dynamischen ausbau der festigkeitslehre // Zeitsch. VDI. 1902. Bd. XXXXVI. N 11.

5. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения. — Новосибирск: Наука, 1984.

6. Глазнев В. Н., Запругаев В. И., Усков В. Н. и др. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

7. Усков В. Н., Цымбалов В. В., Цымбалова Е. Н. Численное решение задачи о нестационарном взаимодействии сверхзвуковой струи с преградой // В сб.: Моделирование в механике. — Новосибирск: ВЦ ИТПМ СО АН СССР, 1987. Т. 18. № 6.

8. Альбазаров Б. Ш. Численное моделирование взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. — Л., 1991.

9. Семилетенко Б. Г., Собколов Б. Н., Усков В. Н. Приближенный расчет амплитудно-частотных характеристик неустойчивого взаимодействия сверхзвуковой струи с нормально расположенной плоской преградой // Известия СО АН СССР. 1975, № 13, Вып. 3.

10. Булат П. В., Засухин О. Н., Продан Н. В. История экспериментальных исследований донного давления // Фундаментальные исследования. 2011. № 12. Часть. 3.

11. Булат П. В., Засухин О. Н., Усков В. Н. Газодинамика и акустика сверхзвуковых струй, истекающих в канал с внезапным расширением // Современные проблемы неравновесной газодинамики. 2002.