

А.В. Дубинин, К.В. Смолян

ЗАВИСИМОСТЬ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПОРЫ ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОГО ГИРОСКОПА ОТ ЗАЗОРОВ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПОРЕ

Рассмотрен вопрос выбора зазоров в скоростной газодинамической опорной системе для динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ). Проведен расчет несущей способности полусферической газодинамической опоры (ГДО) для ДНГ в зависимости от значения зазора. Приведены результаты экспериментального определения несущей способности ГДО с использованием вибростенда и центрифуги, а также рекомендации по выбору значений зазора в ГДО, обеспечивающих наилучшие запасы по несущей способности опоры.

E-mail: 03@niipm.ru

Ключевые слова: динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ), газодинамическая опора (ГДО), газовая смазка, несущая способность.

Введение. Малогабаритный динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ) с газодинамической опорой (ГДО) применяют в системах управления космическими аппаратами в режиме датчика угловой скорости с диапазоном измерения $\pm 10^\circ/\text{с}$, точностью $10^{-2}^\circ/\text{ч}$, ресурсом работы более 10^5 ч. Переход на скоростную ГДО привлекателен не только вследствие ее долговечности. Кроме того, применение такой ГДО избавляет от ряда негативных явлений, обусловленных плотным спектром вибраций, генерируемых шарикоподшипниковой скоростной опорой.

В основу разработки ДНГ с ГДО положена традиционная конструктивная схема ДНГ. При разработке ставилась задача заменить шарикоподшипниковые опоры ГДО с минимальными изменениями конструкции и габаритов ДНГ. С учетом этого удается сохранить без изменений все элементы ДНГ, что, безусловно, ускоряет и удешевляет процесс его создания. Однако малые габаритные размеры опор существенно осложняют решение проблемы обеспечения высокой несущей способности и жесткости ГДО.

Наиболее целесообразной с точки зрения обеспечения достаточных запасов по несущей способности и жесткости ГДО, стабильности положения оси вращения ДНГ, числа запусков при минимальных конструктивных изменениях гироскопа в целом и его узлов, является полусферическая конфигурация рабочих поверхностей ГДО.

Полусферические ГДО способны обеспечить требования к жесткости и несущей способности при несколько больших габаритных размерах, по сравнению с плоскоцилиндрическими ГДО, однако они менее чувствительны к перекосам, допущенным при изготовлении этих опор, а также к несимметричной нагрузке.

Теоретическая основа расчета несущей способности ГДО — система дифференциальных уравнений, описывающих течение газа в зазоре между рабочими поверхностями, одна из которых вращается. Вследствие малых зазоров течение газа является ламинарным и инерционные свойства среды можно не учитывать.

Дифференциальное уравнение Рейнольдса для газовой смазки имеет вид [1]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{p}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{p}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) =$$

$$= 12pV_y + 6 \frac{\partial}{\partial x} (pV_x h) + 6 \frac{\partial}{\partial z} (pV_z h) + 12h \frac{dp}{dt},$$

где V_x , V_y , V_z — компоненты относительной скорости движения рабочих поверхностей в тангенциальном, радиальном и осевом направлении соответственно; h — толщина смазочного слоя в рассматриваемом сечении; μ — динамическая вязкость; p — давление.

При расчете несущей способности ГДО необходимо учитывать нагнетательную способность системы спиральных канавок. Кроме того, наличие у полюса гладкой запорной зоны требует решения несколько других уравнений и, как следствие, стыковки полей на границе профилированной зоны. Поскольку давление газа на этой границе неизвестно, вместо задачи Коши (с начальными условиями) получается пара связанных между собой краевых задач. Сжимаемость газа, определяющая нелинейность уравнений, дополнительно усложняет задачу. Явление скольжения частиц газа по ограничивающим поток поверхностям, заметное при зазорах, сопоставимых с длиной свободного пробега молекул, требует отказа от гипотезы прилипания. Все это, а также необходимость учета геометрии зазора в профилированной зоне, приводит к задаче стыковки решений двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами.

Численно система уравнений, приведенная методом конечных разностей к системе нелинейных уравнений, решается методом Ньютона — Рафсона — Канторовича.

Разработанные на этой теоретической базе специальные компьютерные программы позволяют определять статические характеристики плоских, цилиндрических и сферических газо- и гидродинамических подшипников, а также вычислять жесткости в заданном положении опор и их несущие способности, момент сопротивления и расход газа через опору. Программы предназначены для решения задачи оптимизации конструктивных и «выходных» характеристик опоры (несущей способности, жесткости и др.).

На характеристики ГДО и в первую очередь на ее несущую способность влияет ряд геометрических характеристик (радиус опоры,

зазор, размеры канавок и т. п.), параметры газовой среды (вязкость, длина свободного пробега молекул газа, давление и температура), а также магнитное тяжение, вызванное приводным двигателем, геометрические погрешности контактных поверхностей, тонкие газовые пленки в ГДО и т. д. Расчетный анализ влияния перечисленных факторов весьма затруднителен. В связи с этим достаточно объективную картину работы ГДО в ДНГ можно получить лишь при совместном использовании расчетных и экспериментальных данных.

Приведем результаты расчетного моделирования ГДО, анализа экспериментальных и расчетных данных, в частности по несущей способности ГДО. Вычисления проводились с помощью специализированной программы.

На рис. 1 приведена схема ДНГ с ГДО, на которой показаны основные узлы прибора: маховик 5 на упругом подвесе 7, пара полусфер и втулка ГДО 8, ротор двигателя 10 на валу 9 и статор двигателя 12 [2]. Центр масс вращающейся части ДНГ находится вблизи полюса ближней к маховику полусферы ГДО, при этом радиальная нагрузка на эту полусферу в 6 раз выше, чем на другую.

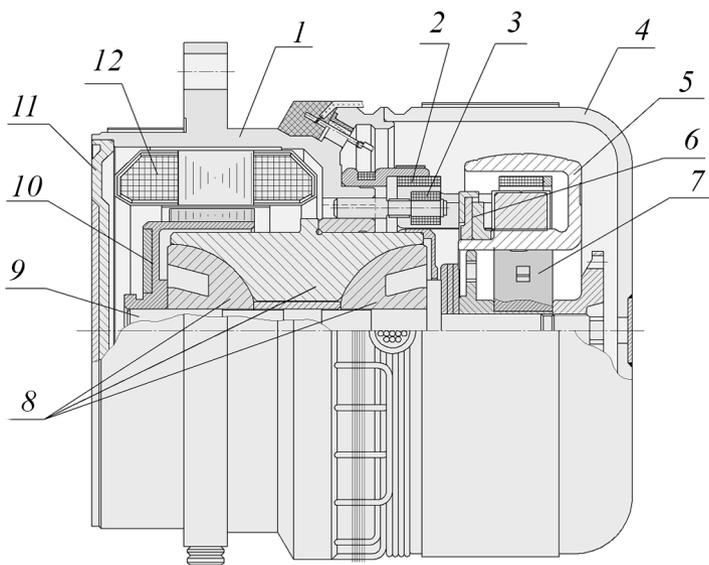


Рис. 1. Схема ДНГ с ГДО:

1 — корпус; 2 — статор ДМ; 3 — статор двигательной установки (ДУ); 4 — кожух; 5 — маховик (ротор ДМ); 6 — ротор ДУ; 7 — упругий подвес; 8 — полусферы и втулка ГДО; 9 — вал; 10 — ротор двигателя; 11 — крышка; 12 — статор двигателя

Исходные данные для расчета содержат информацию о геометрических характеристиках ГДО, параметрах газовой среды и скорости вращения. Геометрические параметры полусферы ГДО показаны на рис. 2.

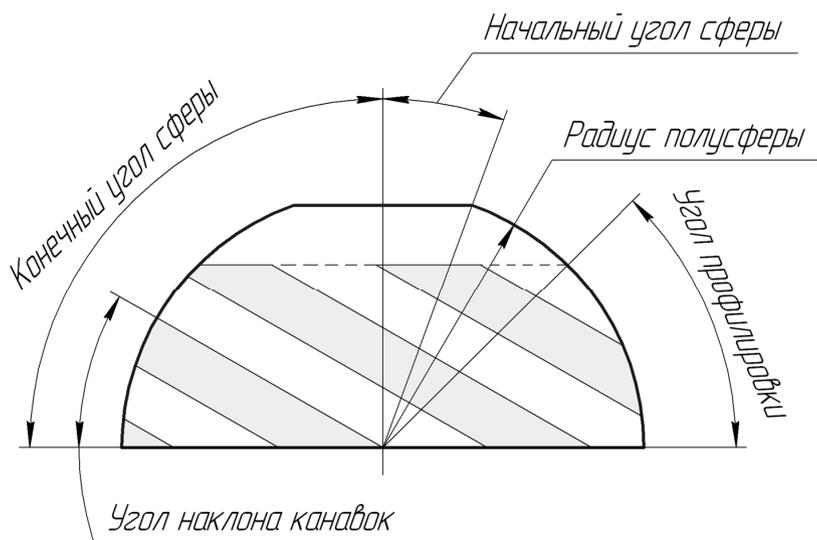


Рис. 2. Геометрические параметры полусферы ГДО

На рис. 3 приведены силовые характеристики полусферической ГДО, полученные с помощью программы расчета. Радиальный зазор ненагруженной ГДО принят равным 1,75 мкм.

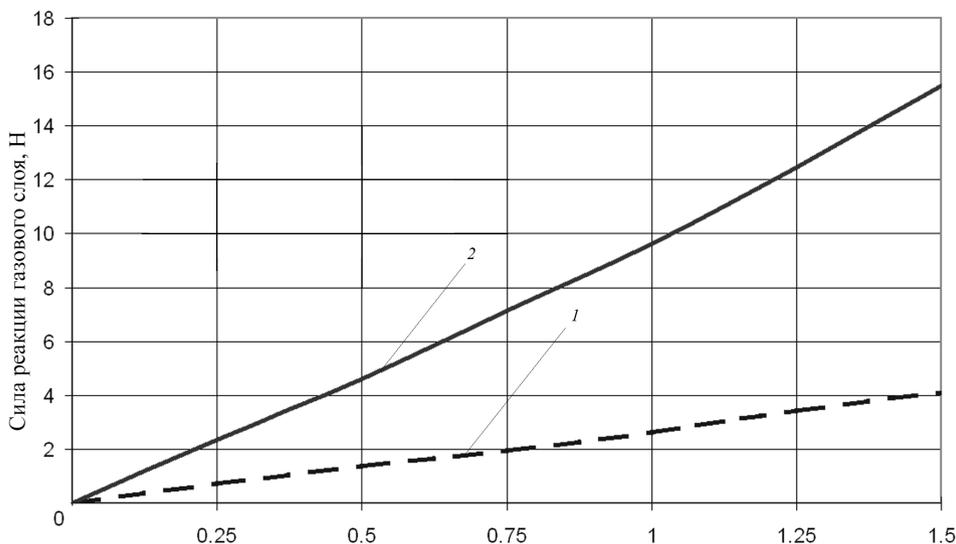


Рис. 3. Силовая характеристика ГДО:

1 — радиальное направление; 2 — осевое направление

Силовая характеристика ГДО близка к линейной (см. рис. 3) и, если известно перемещение ГДО до касания вращающихся полусфер с неподвижной частью (рабочий ход ГДО), то найти соответствующую перегрузку нетрудно. Следует отметить, что реально рабочий ход ограничен не только конструктивно заданным радиальным зазором, но и тем, что

касание вращающихся полусфер с неподвижной частью происходит раньше полной выборки зазора вследствие наличия микронеровностей и других отклонений контактных поверхностей от идеальной сферы. При расчетах несущей способности ГДО это обстоятельство учитывается, полагая рабочий ход меньшим зазора на некоторое значение.

Вычисления с изменением значения рабочего хода в пределах $0,25 \dots 1,50$ мкм показывают, что несущая способность ГДО может изменяться в осевом направлении в диапазоне значений $2,5 \dots 15,5$ Н, и в радиальном направлении — $0,75 \dots 4,00$ Н (при радиальном и осевом зазоре $1,75$ мкм). Погрешность определения несущей способности находится с точностью, с которой известен рабочий ход (или неиспользуемый остаток зазора).

Исходя из допустимых шероховатости и отклонений от круглости рабочих поверхностей ГДО, значение неиспользуемого остатка зазора составляет $0,8$ мкм.

Приведем результаты расчета несущей способности ГДО в радиальном направлении, как в наиболее критичном по несущей способности.

На рис. 4 приведены зависимости радиальной несущей способности ГДО от радиального зазора в ГДО ($1,0 \dots 4,5$ мкм) при различных значениях остатка зазора. Из зависимостей ясно, что если значение остатка зазора превышает $0,75$ мкм, несущая способность резко уменьшается при значениях зазора в ГДО, меньших $1,5$ мкм. Максимум несущей способности смещается в сторону увеличения радиального зазора по мере возрастания остатка зазора. Таким образом, для выбора оптимального радиального зазора в ГДО необходимо знать

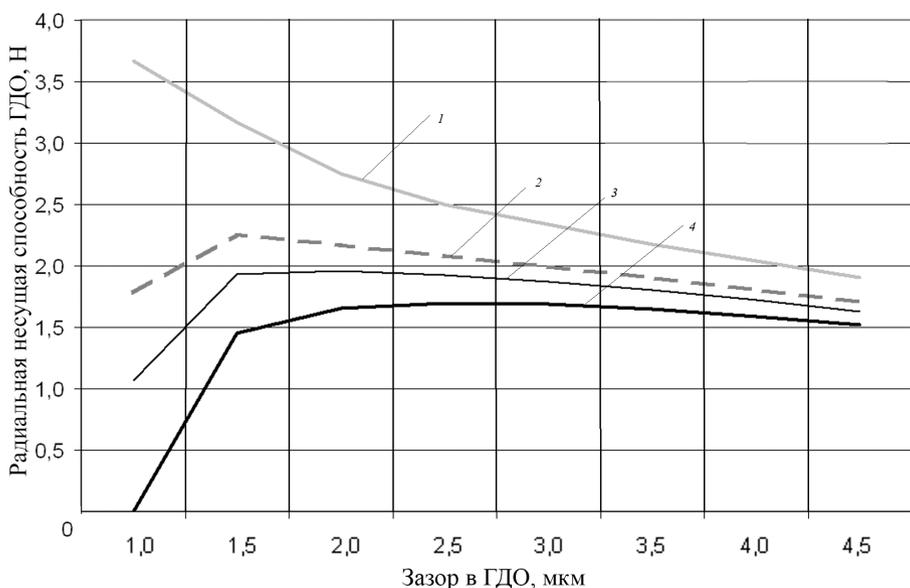


Рис. 4. Зависимость радиальной несущей способности ГДО от зазора при значениях остатка зазора $0,5$ (1), $0,75$ (2), $0,85$ (3) и $1,0$ (4) мкм

реальное значение остатка зазора, которое можно установить экспериментально по оценке несущей способности ГДО.

Несущая способность ГДО в ДНГ определяется экспериментально путем установки прибора на низкочастотный вибростенд или центрифугу с фиксацией задаваемого ускорения в момент касания вращающихся полусфер неподвижной части ГДО.

Радиальная несущая способность ДНГ с ГДО при низкочастотной вибрации и испытаниях на центрифуге составляет около 2 Н. Несущая способность в осевом направлении превышает 4 Н.

Особый интерес представляют данные, свидетельствующие о влиянии осевой вибрации на несущую способность ГДО. Отмечено заметное возрастание несущей способности с увеличением осевого вибровоздействия. Этот эффект известен как «вибровзвешивание» и связан со способностью газовой пленки воспринимать внешнюю нагрузку, когда поверхности, между которыми находится пленка, смещаются по нормали одна относительно другой при вибрации.

Что касается оценки неиспользуемого остатка зазора, то экспериментальные и расчетные значения совпадают для радиальной несущей способности при остатке зазора приблизительно 0,75 мкм.

С учетом полученных данных можно выбрать рациональное по несущей способности значение радиального зазора в ГДО. При значении остатка зазора 0,75 мкм несущая способность ГДО максимальна при зазоре 1,5 мкм (см. рис. 4). Однако при изготовлении ГДО заранее абсолютно точно выставить зазор невозможно в силу технологических причин; поэтому на отклонение значения зазора от номинального значения устанавливается поле допуска 0,5 мкм. При зазоре менее 1,5 мкм несущая способность резко снижается, поэтому целесообразно устранить возможность попадания в эту область, установив допуск на зазор ($1,75 \pm 0,25$) мкм.

Заключение. Анализ проведенных расчетов и экспериментов показывает, что неиспользуемый остаток зазора в ГДО равен 0,75...0,85 мкм, что соответствует оценке исходя из допустимых шероховатости и отклонений от круглости рабочих поверхностей ГДО.

Несущая способность ГДО ДНГ в радиальном направлении составляет около 2 Н, в осевом направлении — 4...5 Н.

С помощью программ при разработке ГДО найдено такое оптимальное значение радиального зазора ($1,75 \pm 0,25$) мкм, при котором достигается максимум несущей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прецизионные газовые подшипники / И.Е. Сипенков, А.Ю. Филиппов, Ю.Я. Болдырев, Б.С. Григорьев и др. / Под ред. А.Ю. Филиппова, И.Е. Сипенкова. — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. — 504 с.
2. Пат. № 2248524. Динамически настраиваемый гироскоп / А.Д. Богатов, А.А. Игнатъев, В.П. Кирюхин, А.А. Коновченко и др. Бюллетень № 8 от 20.03.2005.

Статья поступила в редакцию 4.07.2012