

На правах рукописи

Дубинин Александр Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПОРЫ
МАЛОГАБАРИТНОГО ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОГО
ГИРОСКОПА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.11.03 - приборы навигации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации.

Научный руководитель: **Матвеев Валерий Александрович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Иванов Юрий Владимирович**,
доктор технических наук, профессор кафедры
"Приборы управления" ФГБОУ ВО «Тульский
Государственный Университет»

Ачильдиев Владимир Михайлович,
кандидат технических наук, главный
конструктор МНЭМС ОАО «НПО «Геофизика-
НВ»

Ведущая организация: **Закрытое акционерное общество
«Инерциальные технологии «Технокомплекса»
(ЗАО «ИТТ»)**

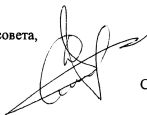
Защита состоится «28» октября 2015 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана» и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, МГТУ имени Н.Э.Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан « ____ » сентября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



Семеренко Д. А.

428

3402

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) в настоящее время широко применяются в качестве чувствительных элементов гиросtabilизированных платформ, бесплатформенных инерциальных навигационных систем и инерциальных блоков, гиротаксметров, систем бортовых курсовертикалей и инклинометров.

Существенным фактором, сдерживающим применение малогабаритных ДНГ в системах управления перспективными космическими аппаратами (КА), является ограничение по ресурсу шарикоподшипниковой скоростной опоры гироскопа.

Выбор типа и параметров скоростной опоры ротора является одним из наиболее важных моментов при создании ДНГ, так как именно она лимитирует срок службы и зачастую является основным источником помех в измерительном тракте прибора и уводящих моментов, вызванных собственной вибрацией. Скоростные опоры ротора при малых габаритах (объем не более $1-2 \text{ см}^3$) должны обеспечивать стабильность углового положения оси вращения и достаточную жёсткость, малые моменты трогания и сопротивления вращению при рабочей скорости до 30 000 об/мин, малый уровень собственной вибрации; иметь работоспособность, исчисляемую десятками и сотнями тысяч часов и тысячами запусков, сохранность параметров после транспортировки и длительного хранения, воздействий вибрации, линейных и угловых ускорений, ударов и перепадов температур.

В настоящее время наиболее совершенные шарикоподшипниковые опоры обладают ресурсом до 50 000 час при скорости вращения 10 000 об/мин и более. Требуемый ресурс для современных КА составляет не менее 10^5 часов, и повышение ресурса является актуальной задачей. Она решается путем применения газодинамических опор (ГДО), которые обладают практически неограниченным ресурсом непрерывной работы. Применение ГДО в качестве опоры ротора малогабаритного ДНГ позволяет повысить ресурс его работы до $1,5 \cdot 10^5$ часов и более и обеспечить низкий уровень собственной вибрации (следовательно, малые шумы в выходном сигнале). Кроме того, сжимаемость смазочного слоя обеспечивает точность положения оси вращения ГДО, превосходящую точность изготовления её деталей, а благодаря высокой степени демпфирования в слое газовой смазки снижено влияние внешних динамических воздействий на подвижную часть ДНГ. Слабая зависимость вязкости газов от температуры обуславливает работу ГДО в широком температурном диапазоне. Это подтверждается многолетней успешной практикой применения подобных опор в высокоточных поплавковых гироскопах для инерциальных навигационных систем. Теория и практика применения ГДО в ДНГ связана с именами М. Л. Еффы, Б. В. Хромова, В. А. Матвеева, Л. З. Новикова, В. С. Славина, В. А. Рожкова и др.

Основной проблемой ГДО по сравнению с шарикоподшипниковыми опорами является обеспечение требуемой несущей способности, особенно в

случае малогабаритных опор. Достаточная несущая способность необходима не только для работы ГДО в условиях действия перегрузок, но и для обеспечения требуемого ресурса по количеству запусков-остановок ДНГ с ГДО, т.к. именно в процессе запусков и остановок происходит износ ГДО из-за действия сил сухого трения, и чем выше несущая способность, тем короче время действия этих сил, а значит, меньше износ и выше ресурс ГДО.

Помимо ограничений по несущей способности ресурс ГДО определяется состоянием её рабочих поверхностей, в частности наличием на них посторонних частиц. На практике в процессе эксплуатации гироскопов с газодинамическими подшипниками случаются отказы из-за «засорения» ГДО. Таким образом, для обеспечения длительного ресурса ДНГ с ГДО необходимо определить и устранить причину таких отказов.

Цель работы

Решение комплексной научно-технической задачи повышения ресурса ГДО малогабаритного ДНГ для космических аппаратов путем теоретического исследования ГДО и ДНГ, включая анализ конструктивных схем и определение основных характеристик ГДО, с подтверждением полученных результатов путем проведения экспериментальных исследований и испытаний ГДО и ДНГ.

Для достижения цели диссертационной работы сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выбор теоретической модели малогабаритной ГДО со спиральными канавками на шипе, анализ конструктивных схем ГДО плоскоцилиндрического и полусферического типа, а также конструктивной схемы малогабаритного ДНГ с полусферической ГДО.

2. Теоретико-расчётное моделирование основных характеристик ГДО при вариациях геометрических параметров опор и параметров газовой среды, с учетом неизбежных отклонений ГДО от идеальной геометрической формы, для определения возможности повышения несущей способности и ресурса.

3. Разработка специальной методики определения основных характеристик ГДО при изготовлении и в составе ДНГ.

4. Подтверждение полученных теоретических результатов путем проведения экспериментальных исследований и испытаний ГДО и ДНГ, в том числе испытаний по определению несущей способности и ресурсных испытаний ДНГ с ГДО с использованием разработанной методики.

5. Исследования износостойких покрытий рабочих поверхностей ГДО для обеспечения длительного ресурса ДНГ.

Объектом исследования в диссертационной работе являются газодинамические опоры, входящие в состав приводного узла малогабаритных высокоточных ДНГ с большим ресурсом работы.

Предмет исследования – конструктивные и функциональные особенности и основные характеристики ГДО малогабаритных ДНГ, определяющие их ресурс, точность и надежность.

Методы исследования

При решении поставленных задач используются методы математического и компьютерного моделирования, численные методы

интерполяции функций, методы прикладной теории гироскопов и газодинамики. Экспериментальные исследования проводятся с использованием стандартных электроизмерительных приборов и специального оборудования методами прямых и косвенных измерений, растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного рентгеновского микроанализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Научная новизна работы

1. Обоснована возможность повышения ресурса полусферических ГДО в малогабаритных прецизионных ДНГ путем моделирования параметров ГДО при вариациях геометрических параметров опор и давления газозаполнения (в диапазоне (50÷80) кПа). Выработаны рекомендации по выбору оптимальных значений зазоров в ГДО для достижения максимальной несущей способности при заданных геометрических параметрах ГДО с учетом отклонений ГДО от идеальной геометрической формы.

2. Разработана оригинальная методика исследования моментных характеристик ГДО автономно (в технологическом приводе) и в составе ДНГ без применения сложной специализированной аппаратуры, с минимальными затратами времени и ресурсов.

3. Исследования деталей ГДО методами растровой электронной микроскопии и микроанализа, а также спектроскопии комбинационного рассеяния света, позволили определить причину появления посторонних частиц на рабочих поверхностях ГДО и связанных с этим отказов ДНГ и выявили необходимость уточнения технологии изготовления деталей ГДО.

4. Получены результаты сравнительных исследований двух модификаций ГДО в составе ДНГ, исследований по определению несущей способности ГДО в составе ДНГ, а также точностные и ресурсные испытаний ДНГ с ГДО, подтвердившие возможность повышения ресурса малогабаритного ДНГ с ГДО.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработанная методика исследования моментных характеристик ГДО упрощает оценку качества опор при их изготовлении.

2. Проведенное теоретико-расчетное моделирование позволило решить задачу повышения несущей способности ГДО. Сравнительные исследования двух модификаций ГДО и исследования по определению несущей способности ГДО в составе ДНГ подтвердили правильность принятых технических решений

3. Проведенные исследования рабочих поверхностей ГДО позволили решить проблему появления посторонних частиц в рабочем зазоре, ухудшавших характеристики ГДО и снижавших ресурс работы ДНГ.

4. Проведенные исследования стали базой для создания ДНГ с ГДО, используемых в системе управления КА с большим ресурсом работы.

Внедрение результатов диссертационной работы

Результаты работы использованы при отработке ДНГ с ГДО типа КИНД05-091, разработанного в филиале ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ ПМ имени академика В. И. Кузнецова», и внедрены в техническую документацию, что подтверждено актом внедрения. Применение ГДО в ДНГ

позволило обеспечить необходимый для КА ресурс работы (не менее $1,5 \cdot 10^5$ ч) с сохранением требуемой точности и надежности, что подтверждается результатами испытаний.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведенное теоретическое исследование и теоретико-расчетное моделирование позволяет определить основные конструктивные решения построения малогабаритного ДНГ с ГДО ротора для обеспечения несущей способности опоры, достаточной для наземной отработки ДНГ и его последующей эксплуатации в составе КА с большим ресурсом работы.

2. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают основные теоретические положения работы. В частности подтверждена достаточная несущая способность ГДО малогабаритного ДНГ при рациональном выборе характеристик ГДО.

3. Построение малогабаритного ДНГ с ГДО ротора позволяет решить задачи большого ресурса работы прибора с обеспечением требуемых точностных параметров и высокой надежности.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также успешной практической реализацией основных технических решений, приведенных в работе.

Личный вклад автора состоит в:

- проведении теоретико-расчетного моделирования и сравнительного анализа параметров ГДО с целью повышения несущей способности;
- разработке специальной методики определения основных характеристик ГДО;
- проведении экспериментальных исследований ГДО и ДНГ, в том числе сравнительных исследований ДНГ с двумя модификациями ГДО;
- проведении анализа результатов экспериментальных исследований ГДО и ДНГ;
- проведении исследований износостойких покрытий рабочих поверхностей ГДО и выработке рекомендаций по устранению причин появления посторонних частиц.

Апробация результатов работы

Полученные в диссертационной работе основные положения и результаты были доложены на следующих научно-технических конференциях:

1. Молодежная конференция Московского отделения Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением» (ФГУП «ЦНИИ автоматики и гидравлики», г. Москва, 11-12 октября 2011 года).

2. XIX Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов, посвящённой 50-летию первого полёта человека в космос (ОАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва», г. Королёв, 14-18 ноября 2011 года).

3. XIV конференция молодых учёных «Навигация и управление движением» (ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, 13–16 марта 2012 года).

4. II Всероссийская научно-техническая конференция «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (ФГУП «Московское опытно-конструкторское бюро «МАРС», г. Москва, 24–26 октября 2012 года).

5. Всероссийская конференция молодых специалистов, учёных и студентов памяти Главного конструктора, академика АН СССР В. И. Кузнецова (филиал ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова», г. Москва, 16–17 апреля 2013 года).

Публикации По теме диссертации опубликованы тезисы трёх докладов на научно-технических конференциях и две статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, общим объемом 1 п. л.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех Глав, общих выводов и заключения. Работа изложена на 119 страницах машинописного текста и содержит 52 рисунка, 18 таблиц и приложение.

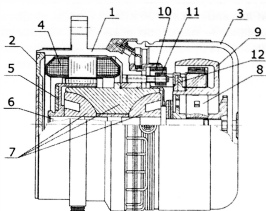
2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована его цель, научная новизна, практическая ценность, основные положения, выносимые на защиту, структура диссертации.

В первой Главе диссертации приведены теоретические основы расчета основных характеристик ГДО (несущей способности, жесткости, момента сил вязкого трения) с использованием уравнений движения газовой смазки.

Особое внимание уделено теории расчета ГДО со спиральными канавками. Профилирование узких канавок осуществляется в зависимости от геометрии опоры (сферической, цилиндрической или плоской) по локсодромическим, винтовым, спиральным линиям относительно рабочей поверхности. Наиболее распространены канавки прямоугольного профиля, которые выполняют на неподвижной части опоры. Канавки сферической ГДО выполняются по локсодромии, пересекающей меридианы сферической поверхности под постоянным углом.

В первой Главе проведен анализ конструктивных вариантов ДНГ с ГДО. Приведена традиционная конструктивно-компоновочная схема ДНГ (Рис. 1), которая предполагает несимметрию расположения масс вращающихся элементов относительно опоры, что создает специфические неблагоприятные условия для применения ГДО; приведены конструктивные схемы ГДО плоскоцилиндрического (Рис. 2, а) и полусферического (Рис. 2, б) типа, а также схема ДНГ с полусферической ГДО (Рис. 3).



1 - корпус, 2 - крышка, 3 - кожух, 4 - статор двигателя, 5 - ротор двигателя, 6 - вал, 7 - ГДО, 8 - упругий подвес, 9 - маховик (ротор ДМ), 10 - статор ДМ, 11 - статор ДУ, 12 - ротор ДУ.

Рис. 3. Конструктивная схема ДНГ с ГДО полусферического типа

Вторая Глава диссертации посвящена теоретико-расчетному моделированию характеристик ГДО для ДНГ с учетом заданных условий эксплуатации. Исходные данные для расчета содержат информацию о геометрических размерах ГДО, давлении газа и скорости вращения. Расчет производился для двух модификаций полусферических ГДО с радиусами полусфер $R = 5,7$ мм (ГДО-1) и $R = 6,0$ мм (ГДО-2), имеющих также различную конфигурацию канавок газодинамического профиля. Расчет проведен с использованием специальной компьютерной программы.

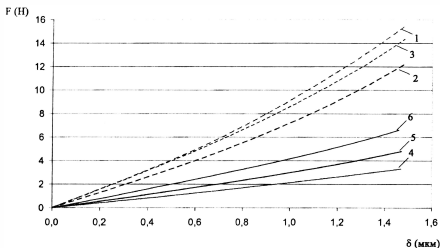
На Рис. 4 в виде графиков приведены результаты проведенного расчета силовых характеристик ГДО-1 и ГДО-2 в радиальном и осевом направлениях соответственно, причем для ГДО-2 расчет проведен для двух значений давления гелия: 50 кПа и 80 кПа.

Как следует из полученных результатов, подъемная сила F в ГДО-1 в осевом направлении более чем в 4 раза выше, чем в радиальном (при одинаковых значениях осевого и радиального эксцентриситетов). Следовательно, радиальная жесткость и несущая способность ГДО-1 существенно меньше осевой. Это отчасти объясняется тем, что большую часть радиальной нагрузки в силу конструктивных особенностей воспринимает одна из двух опор ГДО – ближняя к маховику ДНГ.

Подъемная сила, а следовательно жесткость и несущая способность ГДО-2 в радиальном направлении выше, чем ГДО-1, примерно в 1,4 раза, а в осевом направлении ниже, чем ГДО-1, примерно в 1,25 раза (при одинаковом давлении гелия, равном 50 кПа). Осевая жесткость ГДО-2 превышает радиальную примерно в 2,5 раза.

Жесткость и несущая способность ГДО-2 при давлении гелия 80 кПа выше, чем при давлении гелия 50 кПа, в осевом направлении примерно в 1,2 раза, в радиальном – примерно в 1,4 раза. Осовая жесткость ГДО-2 при давлении гелия 80 кПа превышает радиальную примерно в 2÷2,2 раза.

Таким образом, жесткость и несущая способность ГДО-2 в радиальном направлении повышены по сравнению с ГДО-1 за счет увеличения радиуса полусфер, изменения геометрии газодинамических канавок, и повышения давления газовой среды. При этом разница между осевой и радиальной жесткостью, т.е. неравножесткость снижена по сравнению с ГДО-1.



- 1 – силовая характеристика ГДО-1 в осевом направлении при давлении гелия 50 кПа;
- 2 – силовая характеристика ГДО-2 в осевом направлении при давлении гелия 50 кПа;
- 3 – силовая характеристика ГДО-2 в осевом направлении при давлении гелия 80 кПа;
- 4 – силовая характеристика ГДО-1 в радиальном направлении при давлении гелия 50 кПа;
- 5 – силовая характеристика ГДО-2 в радиальном направлении при давлении гелия 50 кПа;
- 6 – силовая характеристика ГДО-2 в радиальном направлении при давлении гелия 80 кПа.

Рис. 4. Графики силовых характеристик ГДО-1 и ГДО-2

Силовые характеристики $F(\delta)$ ГДО-1 и ГДО-2 близки к линейным, особенно при относительных эксцентриситетах, меньших 0,5. При известном перемещении ротора до касания вращающихся полусфер с неподвижной частью («рабочий ход» ГДО) можно определить величину несущей способности ГДО. Максимальное перемещение определяется не только величиной конструктивно заданного («полного») зазора δ , но и наличием

микронеровностей и других отклонений контактных поверхностей от идеальной сферы, из-за которых касание вращающихся полусфер с неподвижной частью происходит раньше полной выборки зазора δ . При расчётах несущей способности это обстоятельство учитывается, полагая рабочий ход меньшим зазора на некоторую величину.

Вычисления с изменением величины рабочего хода в пределах от 0,25 мкм до 1,5 мкм показывают, что величина несущей способности ГДО-1 при этом может меняться в осевом направлении от 2,5 Н до 15,5 Н, и в радиальном направлении от 0,75 Н до 4 Н (при величине радиального и осевого зазора 1,75 мкм). Погрешность в расчётном определении несущей способности в значительной мере определяется точностью, с которой известна величина рабочего хода (или неиспользуемого остатка зазора).

Исходя из допустимых величин шероховатости (микрогеометрии) и отклонений от круглости (макрогеометрии) рабочих поверхностей ГДО, величина неиспользуемого остатка зазора равна $\delta_0 = 0,75 \dots 0,85$ мкм.

На Рис. 5 и 6 приведены результаты расчёта соответственно радиальной и осевой несущей способности ГДО-1 при вариации величин «полных» радиального δ_r и осевого δ_a зазоров в пределах от 1,0 мкм до 5,0 мкм и значениях остатка зазора δ_0 , равных 0,5 мкм; 0,75 мкм; 0,85 мкм; 1,0 мкм.

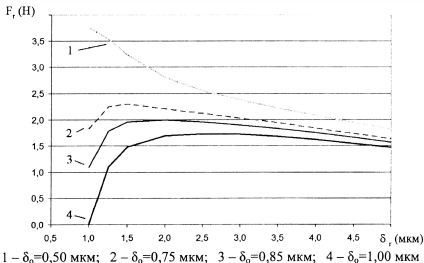


Рис. 5. Зависимость радиальной несущей способности ГДО-1 (F_r) от величины радиального зазора (δ_r) при разных значениях остатка зазора (δ_0)

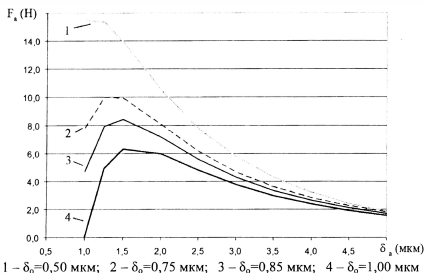


Рис. 6. Зависимость осевой несущей способности ГДО-1 (F_a) от величины осевого зазора (δ_a) при разных значениях остатка зазора (δ_0)

Из графиков видно, что если остаток зазора превышает 0,75 мкм, то несущая способность ГДО резко падает при значениях зазора, меньших 1,5 мкм. Максимум радиальной несущей способности смещается в сторону увеличения величины радиального зазора по мере роста величины остатка зазора. Таким образом, для выбора оптимального радиального зазора в ГДО необходимо знать реальную величину остатка зазора, которую можно определить путём проведения эксперимента по оценке несущей способности ГДО.

В третьей Главе диссертации приведены результаты экспериментальных исследований образцов ГДО в технологическом приводе и ДНГ с ГДО, в том числе испытаний по подтверждению несущей способности ГДО, точностных и ресурсных испытаний ДНГ с ГДО.

Для проведения автономных экспериментальных исследований ГДО с целью определения их характеристик до установки в ДНГ разработаны экспериментальные технологические привод (Рис. 7) и камера для газозаполнения.

ГДО 4 устанавливается в корпус 1 технологического привода при помощи накладок 2 и 3. Вращение ГДО осуществляется от электродвигателя, статор 5 которого вклеен в корпус 1, а ротор 6 крепится на валу ГДО цанговым креплением 7. С обратной стороны на валу ГДО крепится технологический маховик 8, соответствующий по массе и моменту инерции маховику ДНГ, фиксируется гайкой 9 и закрывается кожухом 10. Корпус в сборе крепится к подставкам 11, 12, обеспечивающим его монтаж в технологической камере.

Технологическая камера при проведении испытаний ГДО обеспечивает герметичность газозаполнения с требуемым давлением и составом газовой среды.

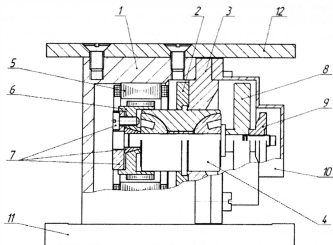


Рис. 7. Эскиз технологического привода ГДО

Для экспериментального определения характеристик ГДО разработана методика экспериментальных исследований, позволяющая определять зависимость момента сопротивления вращению от скорости вращения ротора на выбеге после отключения питания.

В процессе выбега ротора величина подъемной силы в ГДО постепенно уменьшается из-за снижения скорости вращения. Посадка ГДО (т.е. касание вращающихся полусфер ГДО и неподвижной втулки ГДО) происходит, когда подъемная сила становится равна весу вращающейся части прибора. Соответствующую скорость вращения называют скоростью посадки. При посадке происходит переход от вязкого трения в газовой среде к сухому трению рабочих поверхностей ГДО.

Методика испытаний основана на измерении частоты ЭДС, наводимой в обмотках статора электродвигателя ДНГ или технологического привода при выбеге ротора после отключения питания.

По указанной методике проведены испытания 35 образцов ГДО-1 и проведена статистическая обработка полученных результатов, на основании которой установлены допустимые значения параметров ГДО при изготовлении.

Несущая способность ГДО определена экспериментально путем испытаний ДНГ с ГДО на низкочастотном вибростенде с определением величины скорости посадки при различных значениях внешней вибрационной перегрузки.

Из анализа результатов проведенных испытаний следует, что максимальная допустимая для прибора КИНД05-091 радиальная вибрационная перегрузка при частоте 40 Гц составляет 6 единиц. При этом скорость посадки ($N_{\text{пос}} = 27211$ об/мин) близка к рабочей скорости вращения

(30000 об/мин). При проведении испытаний момент трения при посадке плавно увеличивался с ростом перегрузки (увеличение почти в 5 раз), а время выбега ротора, соответственно, уменьшалось (почти в 3,5 раза). Гироскоп при перегрузке 6 единиц продолжал работать в синхронном режиме.

При внешней осевой виброперегрузке до 8 единиц на частоте 40 Гц гироскоп КИНД05-091 работал в синхронном режиме. Скорость посадки при осевой виброперегрузке 8 единиц достигает 4773 об/мин, что практически совпадает со скоростью посадки при радиальной виброперегрузке в 4 единицы.

Таким образом, несущая способность ГДО в радиальном направлении составляет не менее 1,8 Н, что соответствует виброперегрузке 6 ед. частотой 40 Гц, при которой скорость посадки ГДО приближается к рабочей скорости вращения.

Несущая способность ГДО в осевом направлении по крайней мере в два раза выше, чем в радиальном, и составляет не менее 4 Н, что соответствует виброперегрузке 12 ед.

Экспериментальные и расчетные значения радиальной несущей способности совпадают при неиспользуемом остатке зазора $\approx 0,8$ мкм, что соответствует приведённым теоретическим результатам.

В соответствии с разработанной методикой экспериментальных исследований ГДО были проведены сравнительные испытания модификаций ДНГ с ГДО-1 и с ГДО-2, которые показали, что за счёт увеличения радиуса рабочих поверхностей и изменения конфигурации газодинамического профиля (увеличение длины и уменьшение глубины и ширины канавок) радиальная несущая способность повышена не менее чем на 60 %. Вместе с увеличением давления гелия с 50 кПа до 80 кПа радиальная несущая способность увеличивается не менее чем в два раза, осевая несущая способность остается примерно на том же уровне. При этом момент сопротивления вращению в рабочем режиме у ГДО-2 выше на 35...40% и составляет около $4,8 \cdot 10^{-4}$ Н·м (у ГДО-1 $3,6 \cdot 10^{-4}$ Н·м).

Для экспериментального подтверждения правильности принятых технических решений с точки зрения надежности ДНГ с ГДО проведены ресурсные испытания двух гироскопов. В работе приведены результаты измерений их электромеханических и точностных параметров в процессе испытаний. Наиболее критичным показателем с точки зрения функционирования ГДО является количество возможных запусков-остановок, т.к. они определяют износ рабочих поверхностей ГДО из-за воздействия сил сухого трения. Проведенные испытания подтвердили надежность функционирования ДНГ с ГДО при количестве запусков-остановок до 2900 (при этом существенного ухудшения эксплуатационных характеристик приборов не отмечено).

Четвертая Глава диссертации содержит результаты исследований износостойких покрытий, получаемых на рабочих поверхностях ГДО методом конденсации и ионной бомбардировки (КИБ).

Сущность метода КИБ заключается в осаждении покрытий в вакууме из плазмы вакуумной дуги в парах материала распыляемого катода,

находящегося в источнике плазмы, на покрываемые детали из нержавеющей стали, титановых сплавов или бериллия, на которые подается отрицательный потенциал. Положительные ионы осаждаемого материала, ускоряясь из плазмы вакуумной дуги под действием отрицательного потенциала на покрываемых деталях, бомбардируют их.

В процессе эксплуатации гироскопов с ГДО, в том числе ДНГ с ГДО, отмечены случаи отказов по моментным характеристикам вплоть до незапусков приборов. В результате исследований таких случаев установлено, что отказы связаны с появлением на рабочих поверхностях ГДО загрязнений неизвестного происхождения, чаще всего в виде налёта и мазков, выявляемых после разборки отказавших приборов.

С целью определения состава и происхождения загрязнений на рабочих поверхностях ГДО проведены их исследования с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором. В работе приведены изображения загрязнения, полученные с помощью РЭМ (Рис. 8), а также результаты микрорентгеноспектрального анализа, выявившего присутствие на поверхности ГДО углерода (атомная доля до 71 %), а также азота, титана, кислорода, фтора, кремния.

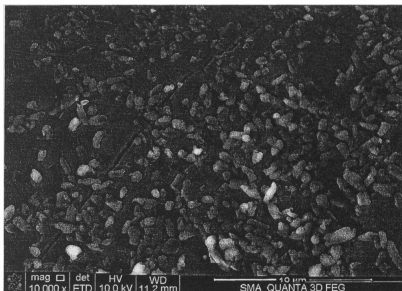


Рис. 8. Посторонние частицы на поверхности полусферы ГДО, увеличение 10^4 крат

Полученные результаты показывают, что загрязнение, обнаруженное на рабочих поверхностях ГДО и представляющее собой мелкодисперсный порошок, свободно лежащий на поверхности, в основном состоит из конгломератов неструктурированного углеродсодержащего материала.

Для идентификации загрязнений на рабочих поверхностях ГДО методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) проведен сравнительный анализ загрязнений с образцами органических веществ, применяемых при изготовлении деталей ГДО, а также деталей и сборочных единиц ДНГ.

На спектрах КР (Рис. 9), полученных с загрязнённых участков поверхности исследованных полусфер, присутствуют линии комбинационного рассеяния света в области $(2800-2900) \text{ см}^{-1}$, соответствующие колебаниям связей С-Н, характерным для органических веществ. На спектрах незагрязнённых участков эти линии отсутствуют. Это даёт основание утверждать, что загрязнение состоит из материала органического происхождения. Из всех спектров КР, полученных при анализе образцов, в наибольшей мере соответствуют загрязнению на полусферах (имеют схожие линии КР в области $(2800-2900) \text{ см}^{-1}$) калий стеариновокислый и флюс № 6, а также связующее вещество доводочных паст.

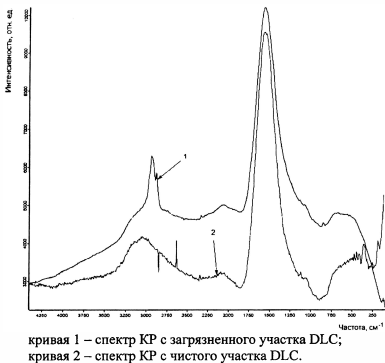


Рис. 9. Спектры КР, полученные при исследовании ГДО

В результате исследования износостойких покрытий на имитаторах ГДО установлено, что покрытие из нитрида титана, получаемое в вакуумных установках определенного типа, может иметь каверны размером до 8 мкм (Рис. 10), что может способствовать появлению загрязнений на рабочих поверхностях ГДО из-за попадания в них связующего вещества доводочных

паст на этапе изготовления деталей ГДО. При промывке данное вещество может удаляться не полностью в силу сложной конфигурации каверн в покрытии.

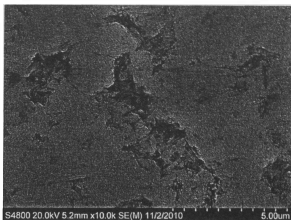


Рис. 10. Изображение каверн в слое нитрида титана

Для обеспечения надежного функционирования ГДО в течение длительного ресурса и устранения установленных причин появления загрязнений выработаны рекомендации по проведению дополнительных технологических мероприятий: введение новых методов очистки рабочих поверхностей ГДО перед сборкой, введение технологической обкрутки с последующей разборкой ГДО и промывкой её деталей, уточнение режимов нанесения износостойких покрытий в вакуумных установках. Указанные технологические мероприятия позволили решить проблему появления загрязнений в ГДО и обеспечить длительный ресурс ДНГ.

В общих выводах и заключениях сформулированы основные результаты диссертации.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обосновано применение в малогабаритном ДНГ для КА с длительным ресурсом работы ГДО с полусферическими рабочими поверхностями, несущая способность которой достаточна для наземной обработки ДНГ и его последующей эксплуатации.

2. Проведено теоретико-расчетное моделирование и установлены основные характеристики двух модификаций малогабаритных ГДО для ДНГ при различных параметрах газовой среды, величинах осевых и радиальных зазоров с учетом зависимости несущей способности от величины неиспользуемого остатка зазора, обусловленного неидеальным исполнением деталей ГДО, что оказалось особенно критично для малогабаритных ГДО с длительным ресурсом работы.

3. Разработана специальная методика определения основных характеристик ГДО и проведены экспериментальные исследования, в результате которых определена несущая способность ГДО малогабаритного ДНГ, проведены сравнительные исследования ДНГ с двумя модификациями ГДО, подтвердившие повышение несущей способности и ресурса ГДО за счет изменения конфигурации канавок газодинамического профиля и увеличения давления газовой среды внутри прибора. Проведены ресурсные испытания ДНГ с ГДО, подтвердившие его надежность и правильность принятых технических решений при проектировании.

4. Проведены исследования деталей ГДО методами растровой электронной микроскопии и микроанализа, а также спектроскопии комбинационного рассеяния света и определены причины появления посторонних частиц на рабочих поверхностях ГДО.

5. Рациональный выбор геометрических размеров ГДО, параметров газовой среды, а также принятые технологические меры позволили решить комплексную научно-техническую задачу повышения ресурса ДНГ с ГДО.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Дубинин А.В., Смолян К.В. Исследование характеристик газодинамических опор для динамически настраиваемых гироскопов // Вопросы оборонной техники. Серия 9. 2012. № 6(258). С. 68-73. (0,29 п.л. / 0,19 п.л.).

2. Дубинин А.В., Смолян К.В. Зависимость несущей способности газодинамической опоры динамически настраиваемого гироскопа от зазоров в газодинамической опоре // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2012. № 55. С. 169-174. (0,27 п.л. / 0,16 п.л.).

3. Смолян К.В., Дубинин А.В. Повышение несущей способности газодинамической опоры динамически настраиваемого гироскопа // Сборник научных трудов РКК «Энергия» им. С.П. Королева. 2012. Серия XII, Выпуск 4. С. 76-79. (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).

4. Дубинин А.В., Смолян К.В. Влияние величины зазоров в газодинамической опоре на несущую способность // Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. М.: МОКБ «Марс». 2012. С. 101-103. (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).

5. Влияние величины зазоров в газодинамической опоре на несущую способность / А.В. Дубинин [и др.] // Всероссийская конференция молодых специалистов, учёных и студентов памяти Главного конструктора, академика АН СССР В.И. Кузнецова: Сборник докладов. М.: Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова». 2014. С. 219-225. (0,24 п.л. / 0,1 п.л.).