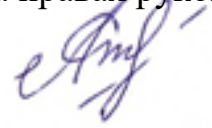


На правах рукописи



Строк Лилия Владимировна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ И
ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ
РАЗМЕРОВ И ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Секацкий Виктор Степанович

Официальные оппоненты: **Данилевич Сергей Борисович**
доктор технических наук, доцент
Новосибирский филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Академия стандартизации, метрологии и сертификации (учебная)», кафедра «Стандартизация, сертификация и менеджмент качества», профессор

Попов Алексей Анатольевич
кандидат технических наук
Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Омской области», отдел метрологического обеспечения и стандартизации, начальник отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет»

Защита состоится 29 сентября 2023 года в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.404.05, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», по адресу; 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из основных направлений Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2017 г. № 737-р, является решение задач по импортозамещению в части производства средств измерений, стандартных образцов, эталонов, что влечет за собой модернизацию или создание нового контрольно-измерительного и испытательного оборудования.

Для повышения точности и плавности перемещения подвижных узлов в контрольно-измерительном и испытательном оборудовании используют опоры с внешним источником давления нагнетания – газостатические и гидростатические, которые имеют преимущества в сравнении с другими типами опор.

Газостатические опоры в основном применяются в контрольно-измерительном оборудовании (координатно-измерительных машинах (КИМ), кругломерах, выотомерах и т.п.), а гидростатические опоры находят применение в направляющих испытательного оборудования.

Результаты литературно-патентного анализа показали, что расчет эксплуатационных (нагрузочных, расходных) характеристик таких опор по всем известным методикам проводится по номинальным значениям размеров. Отклонения размеров, формы, расположения и шероховатость поверхностей не учитываются. Это приводит к тому, при сборке опор используется метод неполной взаимозаменяемости: изготавливается партия опор, экспериментально оцениваются их эксплуатационные характеристики, затем сортируют по группам с близкими характеристиками и осуществляют сборку по одноименным группам, что связано с непроизводительными затратами.

Исследование влияния геометрических отклонений на эксплуатационные характеристики опор и выработка рекомендаций по нормированию их точности является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Исследованиями в области газостатических и гидростатических опор занимались Решетов Д.Н., Кац С.М., Давиденк И. В., Риппел Г., Бушуев В. В. Шейнберг С.А., Жедь В.П., Пуш В.Э., Шатохин С.Н., Коднянко В.А. и другие, российские и зарубежные ученые. Авторами предложены инженерные методики расчета эксплуатационных характеристик различных по конструкции опор по их номинальным геометрическим параметрам. В работах Пуша В.Э., Бушуева В.В., Секацкого В.С. встречаются результаты исследования гидростатических опор, учитывающие отклонения расположения опорных поверхностей на точность вращения шпинделя. Результаты исследований влияния остальных геометрических отклонений (размеров, формы, шероховатости) на характеристики гидростатических опор не выявлены. Для газостатических опор аналогичные исследования также отсутствуют.

Цель диссертационной работы – сокращение производственных затрат и повышение эксплуатационного ресурса газостатических и гидростатических опор прецизионных средств контроля размеров и испытательного оборудования за счет совершенствования методов расчета их характеристик.

Задачи исследования:

1. Определить перечень показателей, характеризующих качество газостатических и гидростатических опор прецизионного контрольно-измерительного и испытательного оборудования.

2. Уточнить математические модели, провести теоретические исследования и дать практические рекомендации по нормированию точности геометрических показателей качества газостатических опор прецизионного контрольно-измерительного оборудования.

3. Провести теоретические исследования гидростатических опор испытательного оборудования и разработать методики нормирования отклонений геометрических параметров опор на их основе.

4. Спроектировать, изготовить экспериментальные стенды и провести испытания для подтверждения результатов теоретических исследований опор.

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»: п. 4 «Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды».

Объект исследования: газостатическая опора с двойным дросселированием воздуха в магистрали нагнетания и осевая незамкнутая гидростатическая опора с центральной рабочей камерой с дросселями постоянного сопротивления.

Предмет исследования: геометрические показатели качества (отклонения размеров, отклонения формы и расположения, шероховатость поверхностей) газостатических и гидростатических опор в прецизионном измерительном и испытательном оборудовании.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработана система показателей качества газостатических и гидростатических опор, которая позволит наиболее полно формировать технические требования к параметрам опор при создании конструкторской, технологической, эксплуатационной документации, технических условий и др.

2. Модернизированы математические модели газостатических опор направляющих прецизионных средств контроля и гидростатических опор испытательного оборудования, которые в отличие от существующих методик расчета, позволяют оперативно проводить расчеты и исследования по выявлению влияния геометрических отклонений опор на их эксплуатационные характеристики.

3. Впервые получены результаты теоретических исследований газостатических и гидростатических опор, которые позволили выработать рекомендации по нормированию точности размеров опорных поверхностей и дросселирующих устройств, по назначению допусков формы и расположения опорных поверхностей и допустимой шероховатости поверхностей опор, используемых при разработке конструкторской и др. документации направляющих прецизионных средств контроля и испытательного оборудования.

4. Впервые экспериментально, с использованием, представленных в данной работе экспериментальных стендов и средств измерительного контроля, установлены закономерности влияния рельефа опорных поверхностей газостатических опор на нагрузочные характеристики опоры и отклонений расположения опорных поверхностей гидростатической опоры на точность позиционирования подвижной части опоры.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны методики нормирования отклонений геометрических параметров газостатической и гидростатической опор. Данные методики позволят наиболее полно учитывать основные параметры опор и регламентировать к ним требования.

Модернизированные математические модели газостатических и гидростатических опор позволяют рассчитывать расходные и нагрузочные характеристики опор с учетом геометрических отклонений опорных поверхностей. Данные математические модели можно использовать для других типов опор в измерительном и испытательном оборудовании.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют нормировать геометрическую точность газостатических и гидростатических опор при их проектировании и изготовлении.

Методы исследования: При решении поставленных задач использовались фундаментальные положения гидродинамической теории смазки и теории математического моделирования, методы многопараметрической оптимизации, аналитические и численные методы математического анализа, компьютерные программы вычислительной математики.

При выполнении экспериментальных исследований применялись поверенные стандартные средства измерений и испытаний.

В качестве информационной базы диссертационного исследования использованы фонды нормативной документации Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, материалы периодической печати, электронные базы данных и периодические электронные издания в сети Интернет.

На защиту выносятся:

1. Система показателей качества газостатических и гидростатических опор.
2. Модернизированные математические модели, позволяющие рассчитывать допустимые значения отклонений геометрических параметров газостатических и гидростатических опор прецизионных средств контроля и испытательного оборудования.
3. Результаты теоретических исследований и методики нормирования отклонений геометрических параметров газостатических и гидростатических опор

прецизионных средств контроля и испытательного оборудования.

4. Результаты экспериментальных исследований газостатических опор с двойным дросселированием и гидростатической опоры с дросселем постоянного сопротивления.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных лично автором, подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных данных. Научные положения аргументированы, теоретические результаты работы и выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями и их математической обработкой, с использованием вычислительных компьютерных программ.

Основные результаты работы докладывались на:

1. XIX Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования», г. Пенза, 20 мая 2022.

2. XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны свободный - 2022», г. Красноярск, 25–30 апреля 2022 г.

3. III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Борисовские чтения», г. Красноярск, 23–24 апреля 2021 г.

4. X Международной научно-практической конференции «Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития», г. Красноярск, 29 апреля 2021 г.

5. X Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука», г. Красноярск, 19–27 апреля 2014 г.

6. VI Международной научно-технической конференции «Проблемы исследования и проектирования машин», г. Пенза, 20–25 ноября 2010 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, в том числе: 8 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК, 8 – в базу SCOPUS, 7 – в базу Web of Science. Получено 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в постановке, планировании и непосредственном проведении теоретических и экспериментальных работ, обобщении полученных результатов, подготовке научных статей.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 172 страниц машинописного текста, 44 рисунка, 7 таблиц. Состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 164 наименований

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, поставлены цель и задачи исследований, определены объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований, приведены методы исследования, представлены сведения об апробации результатов исследования.

В первой главе показана актуальность применения в подвижных узлах контрольно-измерительного оборудования (КИМ, кругломерах, высотомерах)

газостатических опор и в испытательном оборудовании – гидростатических опор. Газостатические и гидростатические опоры обеспечивают высокую точность позиционирования и плавность перемещения подвижных узлов и нашли широкое применение в прецизионном оборудовании.

Результаты проведенного анализа показали, что полученные инженерные методики расчета характеристик различных по конструкции опор предусматривают расчеты по их номинальным параметрам. В работах Пуша В.Э., Бушуева В.В., Секацкого В.С. встречаются результаты исследования гидростатических опор, учитывающие отклонения расположения опорных поверхностей на точность вращения шпинделя. Результаты исследований влияния остальных геометрических отклонений (размеров, формы, шероховатости) на характеристики гидростатических опор не выявлены. Для газостатических опор аналогичные исследования также отсутствуют.

При изготовлении действительные размеры опор отличаются от их номинальных значений, что сказывается на эксплуатационных характеристиках опор. На практике после изготовления опор их испытывают на специальном стенде, сортируют на группы с близкими характеристиками и сборку направляющих осуществляют из одной группы. Это не обеспечивает условие полной взаимозаменяемости и связано с дополнительными затратами.

Вторая глава посвящена разработке показателей качества на газостатические и гидростатические опоры.

Анализ показал, что существующие нормативные документы в области газостатических и гидростатических опор не содержат сведений, определяющих показатели качества, что создает определенные трудности при разработке конструкторской, эксплуатационной и др. документации на опоры.

Фрагмент номенклатуры разработанных показателей качества газостатических и гидростатических опор приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели качества газостатических и гидростатических опор (фрагмент)

№ п/п	Наименование показателя качества	Обозначение показателя	Наименование характеризваемого свойства
1	Показатели назначения		
1.1	Функциональные показатели и показатели технической эффективности		
1.1.1	Статическая несущая способность, Н	w	Нагрузочная способность в статике
1.1.2	Номинальное давление нагнетания, Па	p_n	Давление смазки
1.1.3	Пульсация давления нагнетания, Па	Δp_n	Колебание давления нагнетания
1.1.4	Давление в рабочей камере опоры, Па	p_k	Давление смазки
1.1.5	Расход смазки, м ³ /с (для ГСП) Массовый расход смазки, (кг/с) (для АСП)	q	Расход

Окончание таблицы 1

№ п/п	Наименование показателя качества	Обозначение показателя	Наименование характеризваемого свойства
1.1.6	Вязкость смазки, Па·с	μ	Свойство смазки
1.1.7	Затраты мощности при вращении вала, кВт	$N_{в}$	Энерговооруженность
1.1.8	Затраты мощности при прокачивании смазки, кВт	$N_{п}$	Энерговооруженность
1.1.9	Предельная частота вращения, 1/с	n	Быстроходность
1.2	Конструктивные показатели		
1.2.1	Посадочный диаметр радиальной опоры, мм	d_0	Определяющий размер
1.2.2	Длина радиальной опоры, мм	l_0	Определяющий размер
1.2.3	Наружный диаметр упорной опоры, мм	d_0	Определяющий размер
1.2.4	Внутренний диаметр упорной опоры, мм	d_3	Определяющий размер
1.2.5	Толщина несущего слоя смазки, мкм	h_0	
1.2.6	Отклонения диаметральных и линейных размеров, мкм	Δr	Отклонения размеров
1.2.7	Отклонение от цилиндричности посадочных поверхностей радиальной опоры, мкм	$\Delta \phi$	Отклонение формы поверхностей
1.2.8	Торцевое биение опорных поверхностей упорной опоры, мкм	Δp	Суммарное отклонение
1.2.9	Шероховатость поверхности, мкм	Ra	Шероховатость

Разработана система показателей качества на газостатические и гидростатические опоры, которая позволит устанавливать требования к качеству газостатических и гидростатических опор при разработке технических условий, технических заданий и др. документов, а также позволит комплексно оценивать соответствие продукции установленным требованиям и разработать проект национального стандарта «СПКП. Подшипники газостатические и гидростатические. Номенклатура показателей».

Третья глава посвящена исследованию точностных характеристик газостатических опор, используемых в прецизионных средствах контроля.

В результате анализа конструкций газостатических опор была выбрана газостатическая опора с двойным дросселированием (рисунок 1), которая обладает определенными преимуществами в сравнении с другими типами аналогичных опор и может быть адаптирована к направляющим КИМ. Такая газостатическая опора и принята в качестве объекта дальнейшего исследования.

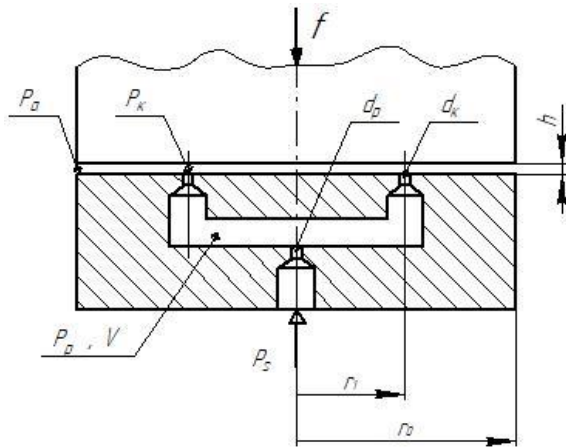


Рисунок 1 – Газостатическая опора с двойным дросселированием

Данный тип опор достаточно полно исследован в области расходных и нагрузочных характеристик, даны рекомендации по выбору сопротивлений дросселирующих устройств, исследована устойчивость опоры. Однако во всех известных методиках расчет эксплуатационных характеристик опор осуществляется по их номинальным параметрам, что не позволяет оценить влияние отклонений геометрических параметров опор на их характеристики и выработать рекомендации по нормированию геометрических отклонений.

Математическая модель газостатической опоры с двойным дросселированием представляет систему уравнений, характеризующих баланс расходов газа через дросселирующие устройства и тонкий слой опоры, а также баланс сил, действующих на подвижную часть опоры.

Тонкий слой опоры при гладких несущих поверхностях характеризуется номинальной толщиной h , а при учете отклонений расположения, отклонений формы и шероховатости поверхности – параметром h_s , величина которого зависит от конкретного геометрического отклонения.

В стационарном режиме краевая задача для функции распределения давления описывается дифференциальным уравнением Рейнольдса с соответствующими граничными условиями

$$\begin{cases} \frac{d}{dr} \left(r h_s^3 p \frac{dp}{dr} \right) = 0, \\ \frac{dp}{dr} (0) = 0, p(r_1) = p_k, p(r_0) = p_a. \end{cases} \quad (1)$$

При решении краевой задачи используем некоторые допущения, широко применяемые при исследовании газостатических опор. Так считаем, что процесс измерения происходит в стационарном режиме, поэтому не учитываются такие динамические составляющие, как силы демпфирования в тонком слое и силы инерции подвижных устройств. По этой же причине не учитывается изменение вязкости смазки в зависимости от температуры. Деформации деталей опоры под действием сил давления, внешней нагрузки и нагрева отдельно не рассматриваем, а учитываем общими геометрическими отклонениями опорных поверхностей в описании толщины несущего слоя.

Для решения краевой задачи с учетом конкретных геометрических отклонений опорных поверхностей в математическую модель вносятся определенные уточнения и определяется метод и методика решения.

Для большей общности результатов отдельные исследования проводим в

безразмерной форме. Для этого в качестве масштабов приняты следующие величины: p_a – для давлений, r_0 – для радиусов, h_0 – для зазора (h_0 соответствует зазору h , при котором опора будет иметь расчетную нагрузку), $\frac{\pi h_0^3 p_a^2}{12\mu\mathcal{R}T}$ – для массовых расходов, $\pi r_0^2 p_a$ – для сил, в частности, для несущей способности.

На первом этапе определены параметры дросселей и эксплуатационных характеристик газостатической опоры. Получены графические зависимости размерных нагрузочных характеристик исследуемой газостатической опоры (рисунок 2 и 3), которые позволяют выбрать оптимальные параметры. Например, при давлении нагнетания $p_s = 0,3$ МПа для толщины несущего слоя $h = 20$ мкм несущая способность опоры (внешняя нагрузка) будет равна $f = 80$ Н (рисунок 2). Для обеспечения расчетных параметров диаметр дросселирующих сопел должен соответствовать $d_p = 0,6$ мм (рисунок 3). При одинаковых размерах опоры несущую способность можно увеличить за счет увеличения давления нагнетания либо за счет уменьшения толщины несущего слоя.

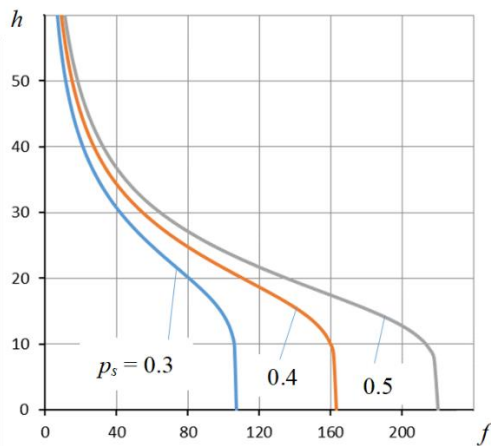


Рисунок 2 – Зависимости толщины несущего слоя h (мкм) от внешней нагрузки f (Н) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа)

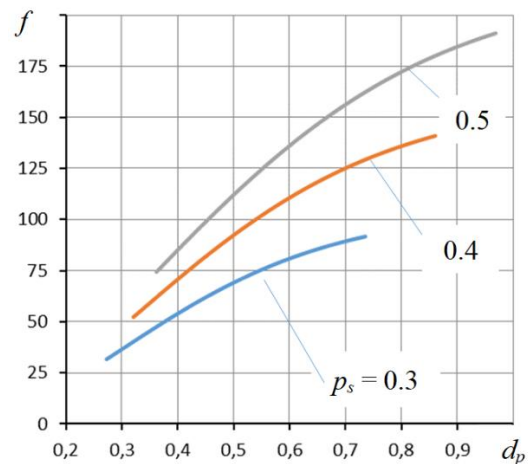


Рисунок 3 – Зависимости внешней нагрузки f (Н) от диаметра дросселирующего сопла d_p (мм) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа)

На втором этапе исследовано влияние отклонений размеров газостатических опор для прецизионного измерительного оборудования на их эксплуатационные характеристики.

Показано влияние отклонения размеров наружного диаметра опоры для трех типоразмеров опор (рисунок 4), влияние погрешности радиуса расположения осей отверстий питателей газостатической опоры (рисунок 5) и влияние погрешности диаметра дросселирующего отверстия (рисунок 6) на положение подвижной части опоры – толщину несущего слоя смазки.

Исследования показали, что наружный радиус газостатической опоры и радиус расположения осей отверстий питателей на характеристики опор оказывают незначительное влияние на характеристики опоры. Поэтому было рекомендовано для нормирования точности наружного диаметра и радиуса

расположения осей отверстий питателей газостатических опор использовать 14 квалитет точности, который относится к среднему условному классу точности, широко используется в машиностроении и приборостроении для нормирования точности свободных размеров. Отклонение исследуемых размеров в пределах допуска по 14 квалитету приведет к изменению точности положения подвижной части опоры в пределах 2–4 % от номинального зазора.

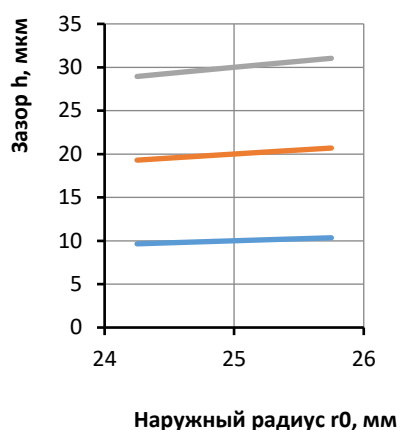


Рисунок 4 – Влияние отклонений размера наружного радиуса r_0

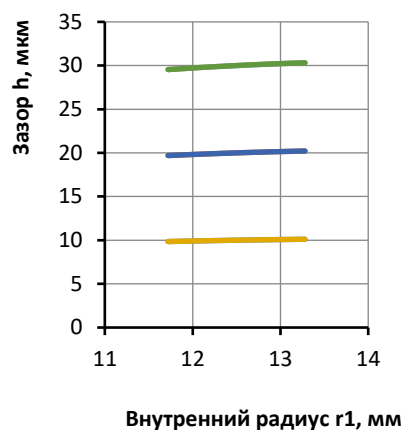


Рисунок 5 – Зависимость изменения толщины несущего слоя h (мкм) в газостатической опоре от изменения радиуса расположения питательных отверстий r_1

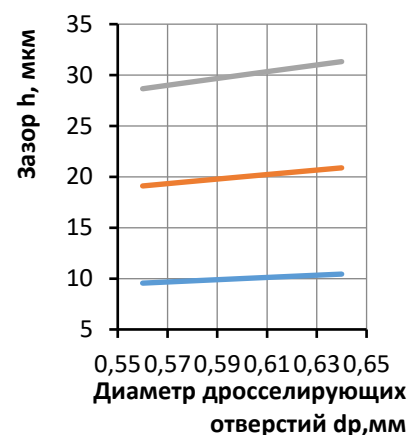


Рисунок 6 – Влияние отклонений дросселирующих отверстий d_p (мм) на точность позиционирования подвижной части опоры

Большее влияние на характеристики газостатической опоры оказывает погрешность диаметров дросселирующих отверстий. Анализ показал, что наиболее чувствительны характеристики опоры к изменению размеров самих дросселирующих отверстий, точность которых при изготовлении должна соответствовать 8 – 10 квалитетам. Повышение точности менее 8 квалитета связано с технологическими и экономическими проблемами, а снижение точности грубее 10 квалитета приведет к изменению расходных характеристик опоры более пяти процентов.

На третьем этапе исследовано влияние отклонения расположения опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры. Наиболее распространенным отклонением расположения опорных поверхностей газостатической опоры, используемой в направляющих прецизионного измерительного оборудования, является отклонение от параллельности δ (рисунок 7). Анализ показал, что отклонение от параллельности оказывает значительное влияние на функцию давления на линии наддува (рисунок 8).

Исследования показали, что несущая способность газостатической опоры при отклонении от параллельности несущих поверхностей в 10 % от толщины несущего слоя опоры снижается на 8 – 9 % для различных наружных радиусов опор и для разных значений толщины несущего слоя.

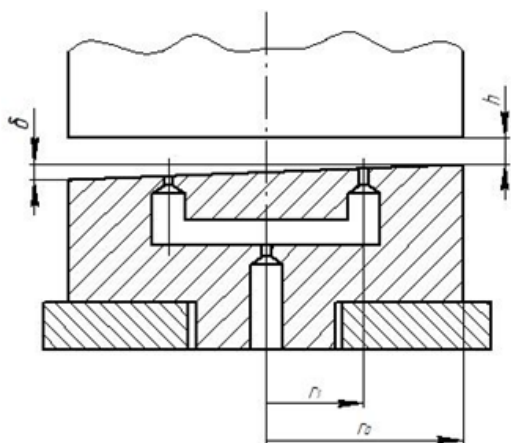


Рисунок 7 – Газостатическая опора с двойным дросселированием с отклонением расположения опорных поверхностей

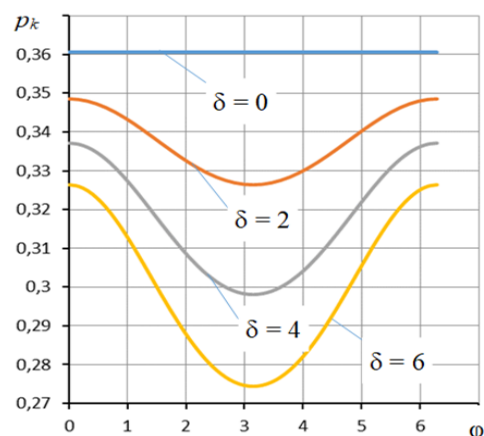


Рисунок 8 – Распределение давления газа p_k (МПа) по диаметру расположения дросселирующих отверстий для разных значений δ (мкм)

В абсолютных единицах можно рекомендовать:

- для опоры диаметром 50 мм при толщине несущего слоя от 10 до 30 мкм допуск параллельности не должен превышать от 1 до 2,5 мкм;
- для опоры диаметром 100 мм при толщине несущего слоя от 10 до 30 мкм допуск параллельности не должен превышать от 1,2 до 3 мкм;
- для опоры диаметром 150 мм при толщине несущего слоя от 10 до 30 мкм допуск параллельности не должен превышать от 1,6 до 4 мкм.

Это соответствует 1 – 3 степеням точности (из 16) по ГОСТ 24643-81.

На четвертом этапе исследовано влияние погрешностей формы опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры. По результатам исследований было установлено, что при проектировании газостатических опор следует учитывать, что отклонения формы несущих поверхностей, соответствующие 20 % от номинального значения толщины несущего слоя могут приводить к изменению несущей способности до 20 % от расчетного значения как в сторону снижения, так и в сторону увеличения. Поэтому допуск формы опорных поверхностей рекомендовано устанавливать в соответствии с 3 – 5 степенью точности.

При оценке влияния шероховатости на несущую способность газостатической опоры установлено, что шероховатость в пределах 20 % от толщины несущего слоя изменяет несущую способность на 5 %. Поэтому рекомендовано при проектировании опор назначать шероховатость поверхности по критерию R_a 0,32 мкм и меньше.

На основе полученных данных была разработана методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор.

Четвертая глава посвящена исследованию точностных характеристик гидростатических опор, используемых в испытательном оборудовании.

Выявлено, что для гидростатических направляющих используют вкладыши, представляющие незамкнутые гидростатические подшипники с центральной рабочей камерой круглой или прямоугольной формы с пассивной компенсацией

расхода смазки (с дросселями постоянного сопротивления). В одном оборудовании устанавливают восемь и более вкладышей, которые для обеспечения равновесного состояния должны обладать одинаковыми техническими характеристиками, которые должны нормироваться при проектировании и обеспечиваться при изготовлении. Незамкнутые гидростатические подшипники с центральной рабочей камерой круглой формы приняты в качестве объекта дальнейших исследований.

На первом этапе исследовано влияние отклонений наружного и внутреннего размеров гидростатических опор в прецизионном оборудовании на их эксплуатационные характеристики.

Влияние погрешности изготовления наружного радиуса на характеристики опоры показано на рисунке 9. Увеличение номинального значения внутреннего радиуса r_1 опоры (уменьшение ширины опорной перемычки) усиливает влияние погрешности изготовления наружного радиуса на отклонение зазора. Расчеты показали, что в исследуемом диапазоне параметров гидростатической опоры при изготовлении наружного радиуса по 12 квалитету максимальное отклонение зазора не будет превышать 2 % от его номинального значения, по 14 квалитету – 5 %, по 16 квалитету – 8 %. Ужесточение точности изготовления наружного радиуса ниже 12 квалитета нецелесообразно.

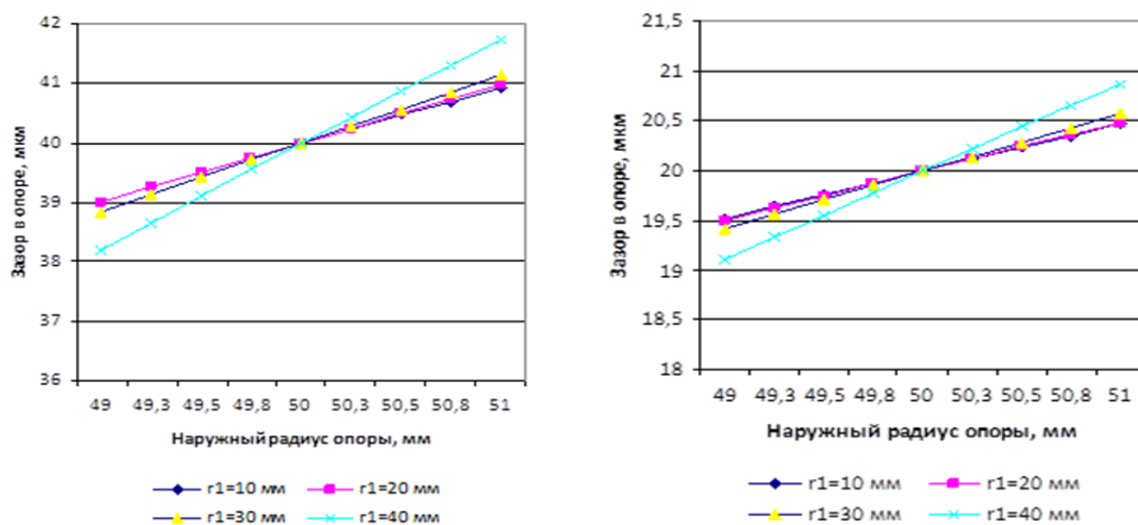


Рисунок 9 – Влияние отклонения наружного радиуса опоры r_0 (мм) на измерения зазора h (мкм) при различных номинальных значениях внутреннего радиуса r_1 (мм):
а) h 40 мкм; б) h 20 мкм

При исследовании влияния погрешности изготовления внутреннего радиуса на характеристики опоры получены неожиданные результаты, которые показывают, что существует определенная зона соотношения наружного и внутреннего диаметров, при которых влияние погрешности внутреннего радиуса может быть сведена к нулю. Для оценки точности опоры в зависимости от погрешности внутреннего диаметра установлен оптимум по соотношению безразмерного давления в рабочей камере с безразмерным значением внутреннего радиуса опоры (рисунок 10).

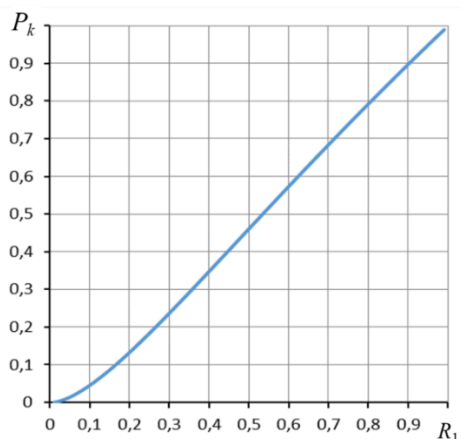
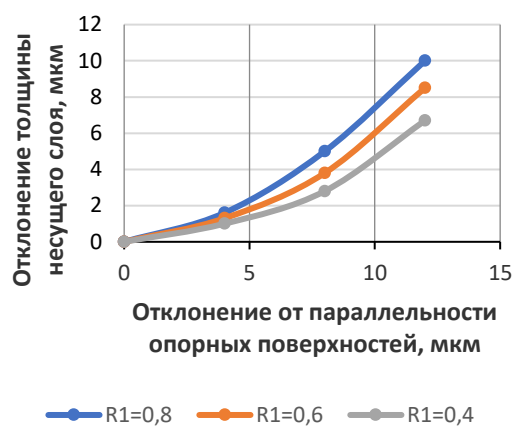
Рисунок 10 – График зависимости $P_k(R_1)$ 

Рисунок 11 - Зависимость отклонения толщины несущего слоя от величины отклонения от параллельности опорных поверхностей

На втором этапе проведен анализ влияния отклонений от параллельности опорных поверхностей гидростатической опоры на изменение толщины несущего слоя, обусловленное изменением ее положения относительно неподвижной части. Результаты расчета для номинального значения толщины несущего слоя 20 мкм приведены на рисунке 11.

Показано, что несущий слой смазки в незамкнутой опоре редуцирует отклонение от параллельности в 2,5 – 3 раза. Следовательно, чтобы обеспечить погрешность позиционирования подвижной части опоры в пределах 10 % от номинального значения допуск параллельности опорных поверхностей должен находиться в пределах от 25 % до 30 % от этого же номинального значения.

Данные рекомендации можно использовать при проектировании направляющих с гидростатическими опорами. Например, для обеспечения смещения подвижной части опоры в пределах 2 мкм при номинальном значении толщины несущего слоя в 20 мкм допуск параллельности опорных поверхностей должен составлять 5 мкм, что соответствует четвертой степени точности по ГОСТ 24643.

На третьем этапе проведен анализ влияния шероховатости опорных поверхностей гидростатической опоры. Исследования показали, что при увеличении шероховатости и уменьшения количества волн происходит незначительное уменьшение несущей способности (0,1 – 0,3 %) и существенное уменьшение расхода смазки. При проектировании опор необходимо назначать шероховатость опорных поверхности по критерию Rz 0,4 мкм и меньше.

На основе полученных данных была разработана методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор.

В пятой главе приводится описание экспериментальных установок для исследования газостатической опоры с двойным дросселированием и гидростатической опоры с дросселем постоянного сопротивления. Разработана методика проведения экспериментальных исследований.

Экспериментально подтверждены адекватность математической модели и расчетных зависимостей для определения характеристик газостатической опоры.

Исследование внешней нагрузки f (Н) от толщины несущего слоя h (мкм) (рисунок 12) и диаметра дроселирующего сопла d_p (мм) (рисунок 13) показали качественное совпадение теоретических и экспериментальных данных. Количественное расхождение лежит в пределах погрешности эксперимента.

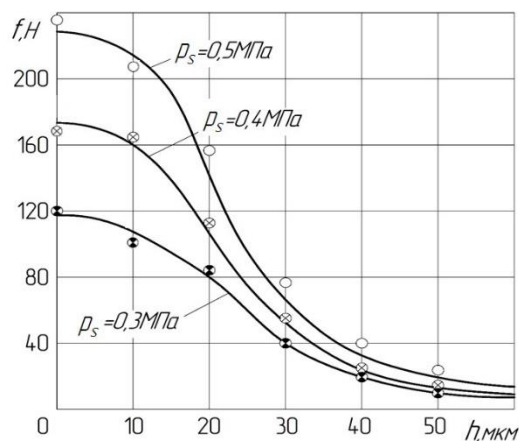


Рисунок 12 – Зависимости внешней нагрузки f (Н) от толщины несущего слоя h (мкм) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа)

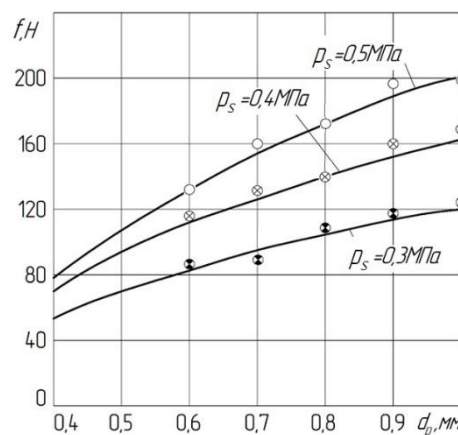


Рисунок 13 – Зависимости внешней нагрузки f (Н) от диаметра дроселирующего сопла d_p (мм) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа) при расчетном зазоре $h_0 = 20$ мкм

Проведены исследования гидростатической опоры при настройке дросселя на толщину несущего слоя 20 мкм и 40 мкм с учетом отклонения от параллельности опорных поверхностей составляло 4, 8 и 12 мкм.

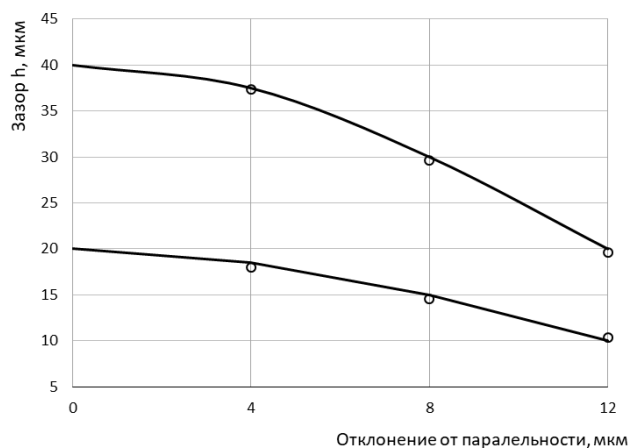


Рисунок 14 – Зависимость отклонения толщины несущего слоя от величины отклонения от параллельности опорных поверхностей незамкнутой гидростатической опоры

Количественное отличие экспериментальных точек от положения теоретических кривых не превышает 4%, что подтверждает справедливость теоретических исследований и разработанных рекомендаций по проектированию газостатических опор, разработанных на их основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, на основании выполненных автором исследований, решена научная задача по совершенствованию методов расчета газостатических и гидростатических опор прецизионных средств контроля размеров и испытательного оборудования. Отрасль знаний - метрология и измерительная техника. **Основные выводы, научные и практические результаты**, полученные и представленные в диссертации, заключаются в следующем:

1. При проведении исследований установлено, что существующие нормативные документы в области газостатических и гидростатических опор не содержат сведений, определяющих показатели качества, что создает определенные трудности при разработке конструкторской, производственной, технологической, эксплуатационной и др. документации на опоры.

Разработана система показателей качества на газостатические и гидростатические опоры, которая позволит устанавливать требования к качеству газостатических и гидростатических опор при разработке технических условий, технических заданий и др. документов.

2. Модернизирована математическая модель газостатической опоры с двойным дросселированием воздуха в магистрали нагнетания. Для решения конкретной задачи в математической модели учтены отклонения геометрических параметров опоры.

Разработана методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор, которая на стадии их проектирования позволит на рабочих чертежах деталей опор обоснованно нормировать:

– отклонения размеров опоры и дросселей в пределах 8 – 14 квалитетов, что обеспечит точностные характеристики опоры в пределах от 2 до 6 % от номинальных значений;

– допуск параллельности опорных поверхностей должен соответствовать 1-3 степени точности, а допуск плоскостности – 3-5 степени точности;

– шероховатость опорных поверхностей не должна превышать по критерию Ra 0,32 мкм.

3. По результатам исследования гидростатической опоры разработаны рекомендации для нормирования точности размеров, расположения и шероховатости опорных поверхностей опоры, используемых в процессе проектирования:

– нормирование точности наружного диаметра гидростатической опоры не следует ужесточать свыше 12 – 14 квалитетов;

– несущий слой смазки в незамкнутой опоре редуцирует отклонение от параллельности в 2,5 – 3 раза. Следовательно, чтобы обеспечить погрешность позиционирования подвижной части опоры в пределах 10 % от номинального значения допуск параллельности опорных поверхностей должен находиться в пределах от 25 % до 30 % от этого же номинального значения;

– шероховатость опорных поверхностей по параметру Ra не должна превышать 0,1 – 0,4 мкм.

Разработана методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор.

4. Разработаны экспериментальные стенды для исследования нагрузочных характеристик газостатической опоры с двойным дросселированием в магистрали нагнетания воздуха и гидростатической опоры с дросселем постоянного сопротивления. Исследования показали, что максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 4 %, что подтверждает удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных данных

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций, включающих систему показателей качества газостатических и гидростатических опор, методику нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор, методику нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор.

Система показателей качества газостатических и гидростатических опор позволит комплексно оценивать соответствие продукции установленным требованиям.

Методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических повысит качество конструкторской документации на элементы опор.

Методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор позволит обоснованно нормировать точность геометрических параметров элементов опор на стадии их проектирования.

Разработанный экспериментальный стенд может быть использован для исследования газостатических опор различных конструкций и способов дросселирования.

Реализация результатов работы. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, используются в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва» и в учебном процессе СФУ при изучении контрольно-измерительного и испытательного оборудования.

На основании результатов проведенного исследования **перспективами дальнейшей разработки темы** будут являться следующие направления:

- проведение научных исследований по определению влияния отклонений геометрических параметров на характеристики замкнутых осевых и радиальных газостатических опор;
- работы по созданию газостатических направляющих для отечественных координатно-измерительных машин;
- разработка проекта национального стандарта «СПКП. Подшипники газостатические и гидростатические. Номенклатура показателей»;
- разработка национальных стандартов, касающиеся проектирования газостатических и гидростатических опор, в основу которых положены апробированные методики.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Строк Л.В. Влияние отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные характеристики / Л.В. Строк, В.А. Коднянко, В.С. Секацкий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – Т.65. №6. – С.443–450.

2. Строк Л.В. Аэростатические опоры в координатно-измерительных машинах / Л.В. Строк, В.С. Секацкий, Ю.А. Пикалов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2020. – №5. – С.26–36.

3. Строк Л.В. Влияние радиально направленной шероховатости на характеристики гидростатической опоры/ Л.В. Строк, В.С. Секацкий, Я.Ю. Пикалов, В.А. Коднянко // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2020. – №4. – С.54–59.

4. Секацкий В.С. Показатели качества гидростатических подшипников / В.С. Секацкий, Л.В. Строк, Н.В. Мерзликина, В.Н. Моргун // Вестник машиностроения. – 2017. – №6. – С.10–15.

5. Строк Л.В. Расчет характеристик незамкнутого осевого гидростатического подшипника с учетом шероховатости опорных поверхностей / Л.В. Строк, Я.Ю. Пикалов, В.С. Секацкий, М.В. Брунгардт // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – Выпуск 3 (43). – 2012. – С.67–71.

6. Коднянко, В.А. Влияние дискретности наддува на статические характеристики кругового аэростатического подпятника / В.А. Коднянко, О.А. Григорьева, Л.В. Строк // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 3. – С. 138–145.

7. Коднянко В.А. Статические характеристики ступенчатого гидростатического подпятника с компенсатором перемещения / В.А. Коднянко, О.А. Григорьева, С.А. Белякова, Л.В. Гоголь, Л.В. Строк, А.В. Суровцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Выпуск 8. С. 208–214.

8. Строк, Л.В. Влияние шероховатости опорных поверхностей на характеристики незамкнутого осевого гидростатического подшипника / Л.В. Строк, Я.Ю. Пикалов, В.С. Секацкий // Известия самарского научного центра российской академии наук. 2011. – Т.13. – № 1-3. – С. 654–657.

Публикации базы данных SCOPUS:

9. Strok L.V. Hydrostatic supports in test and measuring equipment/ L.V. Strok, V.S. Sekatsky, N.V. Merzlikina, Yu.A. Pikalov, I. A. Kaposhko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2020. – Vol. 862 – Is. 3. – P. 322110.

10. Strok L.V. Effect of Roughness Directed Radially on the Hydrostatic Support Characteristics/ L.V. Strok, V.S. Sekatsky, Ya.Yu. Pikalov, I. V. A. Kodnyanko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2020. – Vol. 49– Is. 12. – P. 1021–1026.

11. Kodnyanko, V. Theoretical Investigation on Performance Characteristics of Aerostatic / V. Kodnyanko, S. Shatokhin, A. Kurzakov, Y. Pikalov, M. Brungardt, L. Strok, I. Pikalov // Journal Bearings with Active Displacement Compensator. Appl. Sci. – 2021. – №11. – P.2623.

12. Kodnyanko, V. Numerical Modeling on the Compliance and Load Capacity of a Two-Row Aerostatic / V. Kodnyanko, S. Shatokhin, A. Kurzakov, Y. Pikalov, I. Pikalov, O. Grigorieva, L. Strok, M. Brungardt // Journal Bearing with Longitudinal Microgrooves in the Inter-Row Zone. Applied Sciences. – 2021. – №11(12):5714.

13. Kodnyanko, V. Dynamic Quality of an Aerostatic Thrust Bearing with a Microgroove and Support Center on Elastic Suspension / V. Kodnyanko, S. Shatokhin, A. Kurzakov, L. Strok, Y. Pikalov, I. Pikalov, O. Grigorieva, M. Brungardt // Mathematics. – 2021. – № 9,1492.

14. Kodnyanko, V. Theoretical Efficiency Study of Output Lubricant Flow Rate Regulating Principle on the Example of a Two-Row Aerostatic Journal Bearing with Longitudinal Microgrooves and a System of External Combined Throttling / V. Kodnyanko, S. Shatokhin, A. Kurzakov, Y. Pikalov, L. Strok, I. Pikalov, O. Grigorieva, M. Brungardt // Mathematics – 2021. – № 9,1698.

15. Kodnyanko, V. Theoretical Disquisition on the Static and Dynamic Characteristics of an Adaptive Stepped Hydrostatic Thrust Bearing with a Displacement Compensator / V. Kodnyanko, A. Kurzakov, O. Grigorieva, M. Brungardt, S. Belyakova, L. Gogol, A. Surovtsev, L. Strok // Mathematics. – 2021. – № 9 (2949)

16. Kodnyanko, V. Theoretical Study on Compliance and Stability of Active Gas-Static Journal Bearing with Output Flow Rate Restriction and Damping Chambers / V. Kodnyanko, A. Kurzakov, O. Grigorieva, M. Brungardt, S. Belyakova, L. Gogol, A. Surovtsev, L. Strok // Lubricants – 2021. – Vol. 9. – №12.

Публикации в иных научных изданиях:

17. Насырабади А. Классификация координатно-измерительных машин с применением аэроэстатических опор / А. Насырабади, Л.В. Строк // Актуальные вопросы современной науки и образования: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – Ч. 1. – 2022. – С.43–46.

18. Kodnyanko V.A. Influence of pressurization discreteness on static characteristics of circular aerostatic thrust bearing / V.A. Kodnyanko, O.A. Grigorieva, L.V. Strok // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития: сб. статей X Международной научнопрактической конференции (29 апреля 2021 г.) – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука». – 2021. – С. 9 – 20.

19. Касьянова Л.В. Влияние погрешности зазора на характеристики гидростатических подшипников / Л.В. Касьянова, В.С. Секацкий // Проблемы исследования и проектирования машин: сборник статей VI международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знания. – 2010. – С.31–35.

20. Строк Л.В. Виды шероховатости опорных поверхностей и её влияние на характеристики незамкнутого осевого гидростатического подшипника / Л.В. Строк // Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской

научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Кр. края, Красноярск: СФУ. – 2014. – Электрон. дан. (PDF; 88.25 кБ)

21. Коднянко, В.А. Исследование осевой газостатической опоры с регулятором расхода типа сопло-заслонка / В.А. Коднянко, О.А. Григорьева, Л.В. Строк // Журнал передовых исследований в области естествознания. 2021. – № 13. – С.18-23.

22. Kodnyanko, V. The use of a displacement compensator for improve the static characteristics of a step hydrostatic thrust bearing / V. Kodnyanko, S. Belyakova, O. Grigorieva, L. Gogol, A. Surovtsev, L. Strok // Journal of Research in Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 7 – Is. 7. – P. 11–16.

23. Kodnyanko, V. Study on the characteristics of gas static thrust bearing with partially mobile base / V. Kodnyanko, L. Gogol, S. Belyakova, O. Grigorieva, A. Surovtsev, L. Strok // Österreichisches Multiscience Journal. – 2021. – Vol.1. – №45. – P. 27–39.

24. Касьянова, Л.В. Назначение классов точности гидростатических подшипников / Л.В. Касьянова, Н.В. Мерзликина, В.С. Секацкий // Сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 7 частях, часть 4, СФУ. Красноярск. – 2009. – С.75–77.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

25. Строк, Л.В. Расчет статических характеристик гидростатического подпятника с учетом шероховатости / Л.В. Строк, Я.Ю. Пикалов, В.С. Секацкий // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611329. – правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – 2011.

26. Строк, Л.В. Расчет нагрузочных и расходных характеристик гидростатического подпятника с учетом радиально-волнообразной шероховатости / Л.В. Строк, Я.Ю. Пикалов, В.С. Секацкий, В.А. Коднянко // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614856. – правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – 2011.

27. Строк, Л.В. Расчет нагрузочных и расходных характеристик гидростатического подпятника с учетом вращения пяты и шероховатости опорных поверхностей / Л.В. Строк, Я.Ю. Пикалов, В.С. Секацкий // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617459. – правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – 2011.