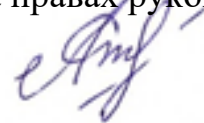


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Секацкий Виктор Степанович

Красноярск 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИСПЫТАНИЙ С ОПОРАМИ С ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАНИЯ.....	11
1.1. Применение газостатических и гидростатических опор в прецизионных средствах контроля и испытательном оборудовании.....	11
1.2. Литературный анализ в области исследований гидростатических опор приборов и машин.....	25
1.3. Особенности расчета газостатических опор машин и приборов.....	28
1.4. Анализ исследований точностных характеристик гидро- и газостатических опор.....	29
1.5. Выводы по первой главе.....	31
ГЛАВА 2. КРИТЕРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ПРЕЦИЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	33
2.1. Анализ нормативной документации на показатели качества продукции....	34
2.2. Разработка показателей качества на газостатические и гидростатические опоры.....	38
2.3 Выводы по второй главе.....	43
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВАХ КОНТРОЛЯ	44
3.1. Особенности конструкций и проектирования газостатических опор в направляющих координатно-измерительных машинах.....	44
3.2. Математическая модель газостатической опоры с двойным регулированием.....	51
3.3. Определение параметров дросселей и эксплуатационных характеристик газостатической опоры.....	54

3.4. Влияние отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные характеристики	61
3.5. Влияние отклонения расположения опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры	68
3.6. Влияние погрешностей формы опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры	74
3.6.1. Влияние отклонений формы опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры	76
3.6.2. Влияние шероховатости опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры	81
3.7. Разработка методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор	82
3.8. Выводы по третьей главе	83
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	85
4.1. Особенности конструкций гидростатических опор в испытательном оборудовании	85
4.2. Математическая модель незамкнутой гидростатической опоры с центральной рабочей камерой	87
4.3. Влияние отклонений размеров гидростатических опор на их эксплуатационные характеристики	90
4.4. Влияние отклонений расположения опорных поверхностей гидростатической опоры на ее характеристики	100
4.5. Влияние кругообразно направленной шероховатости опорных поверхностей на характеристики незамкнутой гидростатической опоры	103
4.6. Разработка методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор	109
4.7. Выводы по четвертой главе	110

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	111
5.1. Экспериментальная проверка газостатической опоры	111
5.1.1. Конструкция экспериментальной газостатической опоры	111
5.1.2. Установка для экспериментального исследования нагрузочных характеристик	114
5.1.3. Методика экспериментального исследования нагрузочных характеристик	118
5.1.4. Результаты экспериментального исследования	119
5.2 Экспериментальная проверка гидростатической опоры.....	122
5.2.1 Стенд для экспериментального исследования гидростатической опоры	123
5.2.2 Методика проведения экспериментальных исследований	125
5.2.3 Результаты экспериментального исследования.....	128
5.3. Выводы по пятой главе.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	134
Приложение 1 Методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор	152
Приложение 2 Методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор	162
Приложение 3 Акт внедрения в учебный процесс	171
Приложение 4 Акт внедрения в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва»	172

ВВЕДЕНИЕ

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, высотомерах 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.

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.

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. В результате исследований получены инженерные методики расчета характеристик различных по конструкции опор 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.

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.

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 проверенные 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. Уточненные математические модели, позволяющие рассчитывать допустимые значения отклонений геометрических параметров газостатических и гидростатических опор прецизионных средств контроля;
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.

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.

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 «Перспективныи 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИСПЫТАНИЙ С ОПОРАМИ С ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАНИЯ

1.1. Применение газостатических и гидростатических опор в прецизионных средствах контроля и испытательном оборудовании

Применение газостатических опор в координатно-измерительных машин (КИМ). КИМ применяют для контроля геометрических параметров деталей (размеров, отклонения формы и расположения поверхностей, углов), а также пространственной ориентации детали или оцифровки чертежей. Учитывая универсальные возможности КИМ часто используют при контроле корпусных или аналогичных деталей сложной формы.

КИМ может заменить практически все специальные приборы и произвести контроль как элементарных, так и комплексных показателей точности зубчатых колес [1, 2, 3] и др. деталей, для контроля которых требуются специальные контрольные приспособления.

В последнее годы повышение сложности процесса контроля вызвано повышением требований к точности изготовления деталей, узлов и механизмов. Примером может послужить отсутствие альтернативы КИМ при проведении производственного контроля двигателей для самолетов пятого поколения [2, 4]. Подобную ситуацию можно наблюдать в космической, военной и др. отраслях.

Ужесточение требований к точности средств измерений (в том числе и к КИМ) обусловлено тенденцией изготовления миниатюрных изделий, что вызвало потребность в достаточно точных измерениях микродеталей, выпускающихся серийно [2, 5].

КИМ позволяют полностью автоматизировать результаты и обработку измерений. Они дают возможность определить прилегающие поверхности,

произвести взаимное вписывание фактического и теоретического профилей по заданному критерию и т. п.

Конструкция базовой части КИМ может включать свой набор определенных функциональных узлов. Однако можно выделить узлы, общие для большинства машин, это [6]: станина, стол, направляющие, измерительная система, датчик контакта, устройство для цилиндрических координат, поворотный стол.

Точность перемещения направляющих или вращения поворотного стола определяется точностью и типом опор в подвижных узлах средства контроля.

На первом этапе развития КИМ в их направляющих широко использовались опоры качения. Основными причинами, сдерживающими их применение, являются:

- проблемы при микроперемещениях в подвижных узлах КИМ, обусловленные трением качения в опоре;
- высокий износ подвижных деталей;
- ограничение применения материалов с низким коэффициентом линейного расширения, например, из твердокаменных пород, подверженность загрязнению и т.п.

В настоящее время большинство КИМ выпускают с использованием в подвижных узлах газостатических опор, которые обладают рядом преимуществ в сравнении с другими опорами [2].

На сегодняшний день основной объем КИМ выпускается за границей. Компания Nikon Metrology (Великобритания), основанная в 1963 г., является старейшим производителем КИМ. Опыт и знания, накопленные более чем за 50 лет, обеспечивают производство современных КИМ серии LKV, которые имеют ряд значимых преимуществ [2, 7]. Температурная стабильность и повышенная жесткость конструкции гарантирована современными керамическими и гранитными материалами. Оригинальные газостатические опоры типа LK обладают большой жесткостью и устойчивостью конструкции, обеспечивают минимальные зазоры в подвижных частях.

Компания «Aberlink Innovative Metrology LLP» (основана в 1993 г.) является вторым крупным производителем в Великобритании [8]. Компания выпускает 4 модификации КИМ модели Axiom too в зависимости от диапазона измерений от 600 мм до 1500 мм. Рабочий стол КИМ модели Axiom too чаще всего выполнен либо из цельного гранита, либо из гранита и пористого алюминия.

Германия также является одним из крупных производителей КИМ. Фирма Carl Zeiss выпускает большой ассортимент порталных, мостовых и настольных КИМ, которые широко используются в различных областях: космической, автомобилестроения, машиностроения и т. п. Например, модель UMM 500 обеспечивает точность измерения детали до 0,5 мкм. Для повышения точности измерений подавляющее большинство КИМ фирмы Carl Zeiss производятся с газостатическими опорами [2, 9].

Газостатические опоры в конструкции КИМ применяют и другие немецкие компании. Так компания Wenzel Präzision производит стоечные и порталные КИМ (мало-, средне- и крупногабаритные) в которых газостатические опоры имеют пассивные демпферы вибраций [10]. КИМ фирмы Werth Messtechnik обладают повышенной точностью и быстродействием. Фирма выпускает самую быструю в мире мультисенсорную КИМ – Werth ScopeCheck FB [11].

В Японии лидеры производства КИМ – компании Mitutoyo [12] и Nikon Metrology [13]. Данные компании выпускают большой ассортимент КИМ, различных размеров и классов точности. В некоторых линейках компаний используются керамические направляющие на газостатических опорах, позволяющие обеспечить устойчивость работы при высоких скоростях и ускорениях перемещения подвижных частей устройств.

Испанская компания Innovalia Metrology [14], итальянская компания Hexagon Metrology [15] выпускают широкий спектр КИМ от малых порталных машин ручного управления до уникальных систем для крупногабаритных объектов. Для обеспечения плавности и легкости перемещения подвижных узлов,

а также повышения точности и стабильности работы КИМ применяют газостатические опоры.

Россия ощутимо отстает по разработкам и производству отечественных КИМ от ведущих индустриальных стран и стран Дальневосточного региона (Китая, Южной Кореи) [16]. Однако российские компании имеют определенные наработки и опыт. Так компания ООО «КИМ-Прецизион» (г. Москва) в период с 1995 по 2005 гг. сконструировала и успешно внедрила на российское автомобилестроительное предприятие серию универсальных отечественных механизированных и автоматических КИМ [17].

На сегодняшний день ООО «Остек-АртТул» (г. Москва) занимается разработкой и производством порталного типа КИМ и переносных КИМ типа «рука» [18]. Шестиосевые КИМ изготавливает ООО «Лапик» (г. Саратов) [16].

ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН» еще в 2011 году разработал КИМ субмикронной точности для обеспечения механической обработки прецизионных деталей сложной формы [19].

Работы по проектированию КИМ с газостатическими направляющими велись в Центральном научно-исследовательском технологическом институте (ЦНИТИ), Пермском научно-исследовательском технологическом институте (ПНИТИ), Московском государственном университете «СТАНКИН», что подтверждается запатентованными конструкциями в данной области [20, 21, 22, 23 и др.].

Кроме КИМ, существует большое количество других видов метрологического оборудования, в которых применяется газостатические подшипники. Например, оборудование для измерения параметров профиля поверхности, круглости, плоскостности, профилей кулачков, турбинных лопаток, оптики, и других изделий с высокими требованиями к точности.

Гидростатические опоры в вибростендах и вибросистемах. В соответствие с национальными и международными стандартами для обеспечения качества и безопасности большинство изделий при испытаниях подвергаются действию вибрационных нагрузок. Диапазон таких изделий достаточно велик: от

телефонов, компьютеров, бытовой техники до двигателей и др. узлов автомобильного и железнодорожного транспорта, ракет и самолетов и т. п. Испытания, как правило, осуществляется на вибростендах (вибросистемах), которые должны обеспечить возможность моделирования сложных динамических процессов.

Компания SHINKEN [24] специализируется на выпуске вибростендов, воспринимающие большие нагрузки. Если опоры качения имеют точечные контакты, то гидростатические воспринимают нагрузку по всей площади поверхности. Поэтому единственным решением в данном случае является использование гидростатических направляющих, что позволяет обеспечить высокую прочность и жесткость устройству.

Общий вид трехосной виброиспытательной системы серии G6 показан на рис. 1.1. Особая технология, реализованная в уникальных системах с гидростатическими опорами, позволяет ограничить взаимное влияние нагрузок по трем осям, что дает возможность максимально точно воспроизвести условия трехкомпонентного нагружения. Вибростенды данной серии способны воспринимать нагрузку до 10 кН.



Рисунок 1.1. – Общий вид виброиспытательной системы компании SHINKEN [24]

Ведущим европейским производителем оборудования в области виброиспытаний является компания Team Corporation [25]. Разработки компании

Team Corporation в области виброиспытаний применяются во всех сферах начиная с вооружения, авио-, ракето- и автомобилестроения до всех типов инструментов. Качество и надежность вибростендов Team Corporation подтверждена многолетним опытом их эксплуатации. Например, для испытания крупногабаритных тяжеловесных объектов со смещенным центром тяжести используется семейство испытательных стендов "HydraShakers", имеющих в конструкции осевые гидростатические опоры. Гидростатические опоры компания использует в электродинамических и сервогидравлических вибростендах, которые имеют до 50 мм смещение хода стола. Для этих стендов разработана модульная конструкция гидростатических опор модели модели T8-2.5 (рис. 1.2), которые могут воспринимать активную вертикальную нагрузку до 45,35 КН. Опоры обеспечивают легкое перемещение, отсутствия люфта, минимальное трение и высокое центрирование. В большинстве случаев их используют по 4 или 6 штук на один стенд (рис. 1.3) [26, 144].



Рисунок 1.2. – Гидростатическая опора модели T8-2.5 [25, 144]

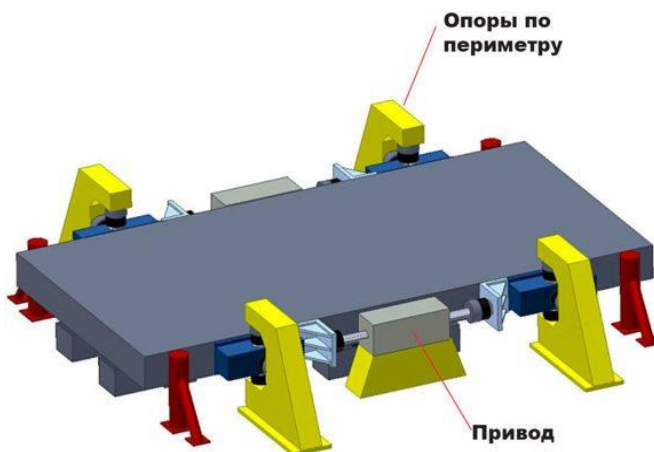


Рисунок 1.3. – Компоновка гидростатических опор на стенде [25, 144]

Большим достижением компании Team Corporation является создание шаровых шарниров, содержащих сферические гидростатические подшипники (рис. 1.4), которые позволяют создавать высокочастотные многоосные испытательные системы с большим ходом.

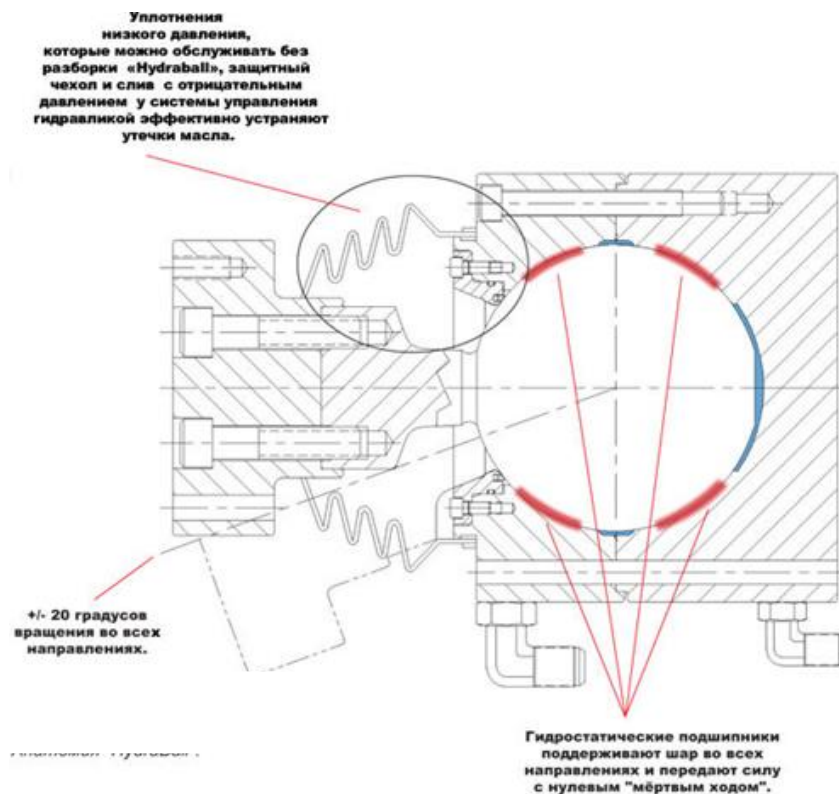


Рисунок 1.4. – Шаровой шарнир с гидростатическими подшипниками [25]

Шаровой шарнир "HydraBall" может отклоняться на 20 градусов в любом направлении от нейтрального положения и обеспечивать прямой путь нагружения от испытываемой нагрузки к штоку привода.

Также компания Team Corporation производит горизонтальные столы скольжения, оснащённые уникальными гидростатическими опорами низкого давления. Такие столы применяются для испытаний сверхгабаритных и крупногабаритных изделий (например, спутниковых конструкций, элементов авиафюзеляжей). Они применяются известными космическими фирмами всего мира [25].

Азиатская компания Suzhou Testing Instrument разрабатывает и производит оборудования для испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам, частности и на вибростойкость. Компания выпускает оборудование с гидростатическими направляющими. Например, электродинамический вибростенд применяется для испытаний крупногабаритных образцов в авиации, аэрокосмическом секторе, оборонной промышленности, железнодорожном транспорте, автомобилестроении, судостроении и т. п.

Особенностью данного вибростенда является способность восприятия увеличенного опрокидывающего момента, благодаря конструкции дополнительной гидростатической несущей направляющей [26].

Одним из мировых лидеров разработки виброиспытательных систем является компания SHINKEN (Япония), основанная в 1975 году. Компания производит вибровозбудители и системы как на воздушных, так и на гидростатических опорах. Например, в трехосной виброиспытательной системе серии G-6 используется уникальная система с гидростатическими опорами, позволяющая ограничить взаимное влияние нагрузок по трем осям. Это позволяет улучшить характеристики управляемости и максимально точно воспроизвести условия трехкомпонентного нагружения [24]. Семейство виброиспытательного оборудования серии G-0 могут оснащаться различными направляющими с механическими, воздушными и гидростатическими опорами. Двухосная виброиспытательная система серии G-8, виброиспытательная система для моделирования транспортировочных нагрузок серии G-9, а также горизонтальные столы серии G-61 работают на гидростатических опорах [24]. Стол на гидростатических опорах используется для проведения высокочастотных испытаний при действии опрокидывающего момента.

Компания IMV Corporation (Япония) производит электродинамические системы, позволяющие проводить испытания на вибрацию удар и комбинированные испытания. Компания выпускает многоосные электродинамические испытательные установки одновременного и последовательного воздействия (серия «TS» трехосные и серия «DS» двухосные) [27] обладающее высокой жесткостью подвижных частей. В этих установках используются гидростатические опоры высоких классов точности.

В Европе одним из ведущих производителей электродинамических вибрационных стендов является компания «TIRA GmbH» (Германия) основанная в 1947 году. Компания TIRA выпускает скользящие столы на гидростатических опорах со специальным металлическим скользящим покрытием, максимальный

размер которых 2000×2000 мм [28]. Применение скользящих столов на гидростатической основе позволяет проводить широкий диапазон тестирования крупногабаритных объектов.

Оборудование для вибрационных испытаний выпускают китайские компании DONGLING и ETS Solutions. Компания DONGLING специализируется на проектировании, разработке и производстве оборудования для вибрационных испытаний с горизонтальными столами скольжения серии ВТ с гидростатическими опорами [29]. Гидростатические опоры позволяют обеспечить более высокую устойчивость к опрокидывающему моменту. Сопротивление опрокидывающему моменту возрастает с увеличением количества опор.

Компания ETS Solutions выпускает вибростенды серии MDOF с возможностью многоосевой вибрации с уникальными сферическими гидростатическими опорами, позволяющими обеспечить высокую степень передачи вибрации, а также демпфировать опрокидывающий момент в процессе испытания [30].

Анализ выпускаемых вибростендов показал, что для горизонтальных столов используется в основном два типа гидростатических опор: сферические гидростатические опоры в шаровых шарнирах и гидростатические опоры, воспринимающие осевую нагрузку, в направляющих столов. Для обеспечения устойчивого положения столов и восприятию больших опрокидывающих моментов таких опор устанавливают четыре, шесть и более. Кроме того, для обеспечения силового замыкания опоры располагаются как снизу стола, так и сверху (см. рис. 1.3). Для эффективной работы направляющих стола все опоры должны обладать одинаковыми эксплуатационными характеристиками, которые зависят от точности изготовления размеров, формы, расположения, шероховатости несущих поверхностей опоры и дросселирующих устройств. Это можно обеспечить жестким нормированием точности всех геометрических параметров на стадии проектирования и соблюдением при изготовлении и монтаже либо использовать второй путь, который широко используется при изготовлении опор качения, сортировку после изготовления на одноименные группы сборки в

пределах одной группы. Метод сортировки для опор качения оправдан их массовым изготовлением. Для гидростатических опор остается первый способ – жесткое нормирование геометрии. Сложность заключается в том, что на настоящий момент времени отсутствуют инженерные методики расчетов, позволяющие определять допустимые значения параметров от заданного качества опор.

Актуаторы и приводы на гидростатических опорах. Компания «GDS Instruments» (Великобритания), основанная в 1979 году, входит в состав «Global Digital Systems» Ltd и является мировым лидером в разработке и производстве испытательного оборудования, применяемого в геологии и геотехнике как в лабораторных условиях, так и в полевых. Компания разработала бессальниковые приводы с использованием гидростатических опор, которые успешно применяются в аппарате GDS для трехосных испытаний (рис. 1.5). Трехосный аппарат GDS отличается от своих аналогов тем, что контроль может независимо осуществляться по трем направлениям [28].

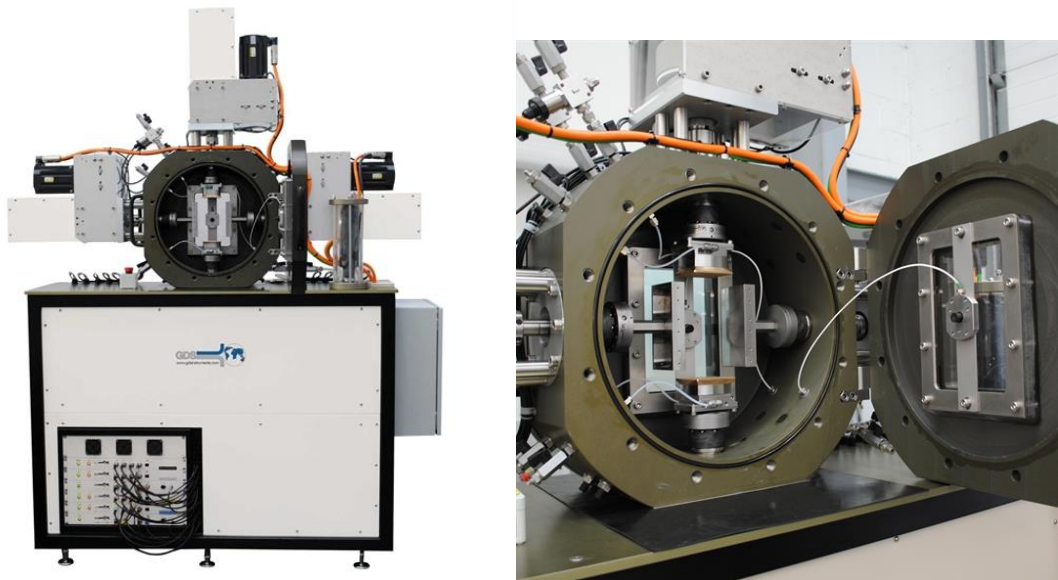


Рисунок 1.5. – Трехосный аппарат GDS [28]

В испытательных машинах на усталость фирмы Instron (США) применяются приводы на гидростатических опорах. Так, например, испытательная машина на

усталость 8803 оснащена приводом на гидростатических опорах, которые снижают влияние боковой нагрузки [31].

В сервогидравлических усталостных испытательных машинах и системах используются актуаторы с гидростатическими подшипниками, показанные на рис. 1.6. Гидростатические подшипники обеспечивают самоцентрирование при действии боковых нагрузок, снижают трение, что актуально в системах управления и имеют другие преимущества в сравнении с подшипниками скольжения [32].

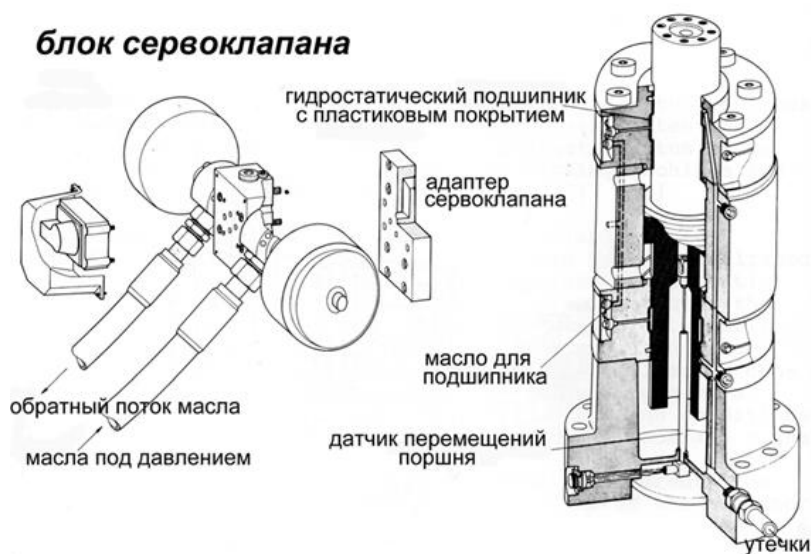


Рисунок 1.6. – Линейный актуатор с гидростатическими подшипниками [32]

Аналогичные актуаторы с гидростатическими опорами используются в сервогидравлических вибростендах серии HV (компания L.A.V. Equipment, США) [33], в многоцелевых сервогидравлических динамических испытательных машинах серии LFV 25-100 кН (фирма "Walter + Bai AG", Швейцария) [34] и др.

Компания «VIA» (Франция) является технологическим лидером в области проектирования, разработки и изготовлением испытательных систем для испытаний тяжелой техники, изготавливаемой на предприятиях авиационной и автомобильной промышленности. В данных системах используются высококачественные гидроцилиндры с гидростатическими опорами и

пульсаторами давления, которые позволяют имитировать движение испытываемых объектов по дороге с заданными техническими характеристиками [35]. Кроме того, ВИА выпускает несколько линеек динамометров с гидростатическими опорами:

- высокоскоростные динамометры, предназначенных для испытания высокоскоростных электродвигателей с высоким моментом;
- высокооборотные динамометры, позволяющие имитировать как нагрузку, так и сами приводы в электромобилях нового поколения.

Перспективность применения гидравлического динамометра с гидростатическими опорами в различных отраслях отмечается и в работе [36].

В России работы по проектированию испытательного оборудования с гидростатическими опорами вылились в Томском политехническом университете, ТОО "Системы и технологии", АО СКБ "Точрадиомаш" и др. [37, 38]. Кроме того, можно отметить ряд запатентованных гидростатических опор для испытательного оборудования [39, 40] или запатентованных конструкций испытательных стендов с использованием гидростатических опор и направляющих [37, 41, 42, 43, 44].

Гидростатические опоры в тяжелонагруженном оборудовании. В Крымской астрономической обсерватории установлен телескоп с зеркалом 2,6 м и массой 62 тонн, который вращается на гидростатических опорах, представляющих собой отдельные подушки. Для плавного и легкого вращения телескопа давление нагнетания масла в гидростатические опоры составляет 4,0 МПа [45].

Гидростатические опоры не имеют альтернативы в тяжелых телескопах. Так большой азимутальный телескоп специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук массой 650 тонн имеет возможность перемещения подвижной части телескопа благодаря гидравлическим опорам (рис. 1.7) с точностью до десятых долей угловой секунды [46, 47].



Рисунок 1.7. – Гидравлические опоры азимутального телескопа [46, 47]

Одним из пяти основных направлений немецкой компании ZOLLERN является производство опор, в том числе специальных гидростатических. Например, фрикционный балансир (рис. 1.8, а), предназначенный для измерения момента трения подшипников качения, выдерживающий нагрузку в радиальном направлении до 250 кН и осевом 100 кН [48]. Или подшипниковый блок в специальном исполнении (рис. 1.8, б), применяемый в испытательных стендах для измерения шума качения, обеспечивает число оборотов до 1200 об/мин при сохранении высокой осевой и радиальной жесткости.

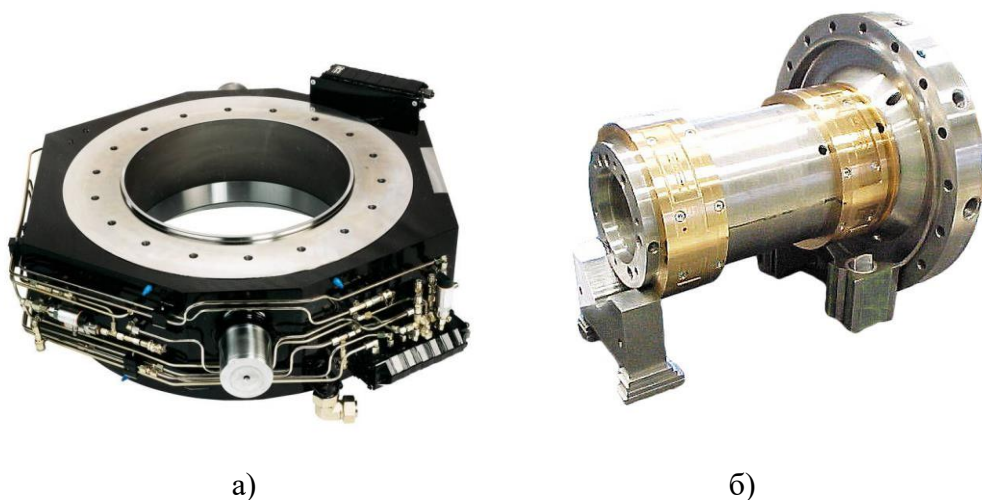


Рисунок 1.8. – Гидростатические специальные опоры компании ZOLLERN [48]

Анализ конструкций актуаторов и приводов на гидростатических опорах, а также другого тяжелого оборудования показал, что в данных узлах применяются

как радиальных гидростатические опоры, так и осевые. По форме и конструктивному исполнению такие опоры схожи с гидростатическими опорами, применяемые в шпиндельных узлах металлорежущих станков.

Гидростатические опоры в прецизионном измерительном оборудовании.

Для измерительных машин, позволяющих измерять отклонения геометрических параметров крупногабаритных деталей, компания ZOLLERN выпускает поворотные столы (рис. 1.9, а) на гидростатических опорах (рис. 1.9,б) диаметром до 550 мм [48]. Поворотный стол диаметром 1000 мм способен воспринимать осевую нагрузку до 120 кН и обеспечивать осевое биение менее 1 мкм.

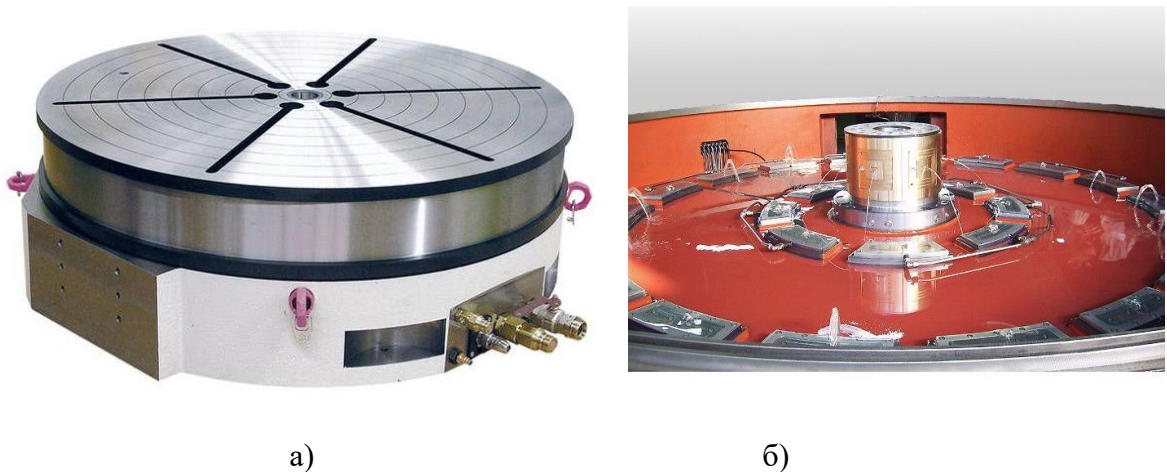


Рисунок 1.9. – Гидростатический поворотный стол компании ZOLLERN на гидростатических опорах [48]

Измерительные системы Talyrond 440/450 (рис. 1.10), разработанные фирмой Taylor Hobson (Англия), предназначены для проведения точных и сложных измерений параметров геометрии тяжелых изделий в различных отраслях автомобильной, подшипниковой, авиастроительной промышленности. В зависимости от особенности конструкции детали, может использоваться модель 440 с вращающимся столом, либо модель 450 – с вращающимся датчиком. Колона прибора в этих моделях перемещается на гидростатических направляющих, а шпиндель вращается в гидростатических опорах. Погрешность измерительной

системы в радиальном направлении составляет $0,05\text{мкм} + 0,0003\text{мкм/мм}$ над поверхностью рабочего стола [49].



Рисунок 1.10. – Измерительные системы Talysond 440/450 [49]

1.2. Литературный анализ в области исследований гидростатических опор приборов и машин

Интерес к исследованию гидростатических опор приборов и машин велик, о чем свидетельствует большой поток публикаций на данную тему.

Основные отечественные исследования и разработки в этой области науки и техники были выполнены под руководством ведущих исследователей А.В. Пуша, и В.В. Бушуева (МГТУ «СТАНКИН»), В.Н. Прокофьева и Д.Н. Решетова (МГТУ им. Баумана), Г.Х. Ингерта, Г.А. Левита, Ю.Н. Соколова, (НПО ЭНИМС); А.И. Белоусова и В.М. Давыдова (Харьковский авиационный ГТУ), С.Н. Шатохина и В.С. Секацкого (СФУ –ранее КГТУ, г. Красноярск) и др.

Аналогичные исследования проводились и в других странах. Можно отметить исследования, проведенные в США (НИИ им. Франклина), в Великобритании (Кембриджский университет), в Германии (фирма MTIRA, Технический университет г. Лейпциг) в Японии (фирма Toyota Koki K.K.) и др.

Первые рекомендации и методики расчета элементарных гидростатических опор приведены в работе Г. Риппела [50]. Развитие теории и практики в области проектирования и эксплуатации гидростатических опор находят в работах Бушуева В.В., Шатохина С.Н. и др. [51–54 и др.].

Большое количество работ посвящено проектированию гидростатических подшипников и направляющих металлорежущих станков. Общие вопросы конструирования механизмов с гидростатическими опорами приведены в работе Решетова Д.Н. [55]. Проников А.С. в справочнике [56] рассматривает различные виды гидростатических опор, приводит расчеты их основных характеристик (нагрузочная способность, жесткость, расход смазочного материала и т.п.), рекомендации по оптимизации этих параметров. Большой вклад в проектирование гидростатических опор для станочных узлов внес В.Э. Пуш со своими учениками. Особое внимание они уделяли применению средств автоматизации конструирования и необходимости прогнозирования выходных параметров точности узлов станка и станка в целом [57, 58].

Исследованию гидростатических опор посвящено не мало сборников. Примером может служить сборник статей, посвященный вопросам проектирования гидростатических упорных и опорных опор, под редакцией Г.С. Скубачевского [59].

Большая часть разработок и исследований проведены для гидростатических опор при системе питания с дросселями постоянного сопротивления. Исследовались как статические, так и динамические характеристики. Результаты теоретического исследования статических характеристик приведены для гидростатических опор с капиллярными дросселями [58, 60], для опор со щелевыми дросселями [54], для опор с дросселями в виде набора шайб [61] или в виде диафрагмы [62].

Динамические характеристики гидростатических опор с постоянными внешними дросселями исследованы в работах [52, 63, 64]. В работах [65, 66] для улучшения динамических характеристик, в том числе повышения устойчивости

опоры, предложено использовать систему комбинированного (двойного) дросселирования.

В ряде работ исследован гидродинамический эффект, проявляющийся в высокоскоростных радиальных гидростатических опорах [67, 68]. Увеличение несущей способности опоры объясняется окружным переносом рабочей жидкости из одной рабочей камеры в другую за счет вращения шпинделя.

При исследовании динамических характеристик у высокоскоростных гидростатических опор наблюдалось появление кавитации [66, 67]. В работе [69] приведена методика расчёта параметрической границы кавитации и предложены меры её устранения.

Результаты исследования гидростатических опор ступенчатого типа с положительной самокомпенсацией, представлены в работах [70–72].

Перспективными являются исследования гидростатических опор с активной компенсацией расхода смазки. В таких опорах имеется возможность существенного снижения податливости опоры, вплоть до отрицательных значений. Однако на настоящий момент времени результаты исследований противоречивые. В работах [73, 74], утверждается, что при этом неизбежно возникают автоколебания. Для устранения автоколебаний предлагается устанавливать в несущие карманы аккумулялирующих элементов [75, 76].

Большое число исследований посвящено оптимизации конструктивных и режимных параметров гидростатических опор пассивного типа [77, 78, 79].

В Политехническом институте СФУ (КГТУ, КрПИ) накоплен большой опыт в области исследования, проектирования и практического использования гидростатических опор. Примером могут служить работы Шатохина С.Н. [69, 70, 80, 87 и др.], Коднянко В.А. [71, 72, 81, 82 и др.], Секацкого В.С. [2, 83 – 85], Пикалова Я.Ю. [86, 87 и др.], Брунгарда М.В. [82, 86, 87] и др.

1.3. Особенности расчета газостатических опор машин и приборов

Возможность использования газа в качестве смазки в опорах скольжения была известна еще в конце 19-ого столетия. Практическое применение эта идея нашла только в 1949 году, когда под руководством профессора С.А. Шейнберга были спроектированы и изготовлены опоры скольжения, работающие на газовой смазке [88, 89], которые нашли свое применение приборах и машинах самого различного назначения.

В нашей стране наиболее значительные результаты исследования, разработки и применения в этой области были получены в: НПО ЭНИМС (С.А. Шейнберг, В.П. Жедь, Ю.Б. Табачников), СФУ (С.Н. Шатохин, Пикалов Ю.А., Коднянко В.А.), ЦНИИ «Электроприбор» (И.Б. Позерн, В.М. Грибов), ЦКТИ им. И.И. Ползунова (Г.А. Лучин), НИУ ИТМО (В.Н. Дроздович, Н.Г. Проскуряков, В.В. Иванова), НИИ Машиноведения (С.В. Пинегин, М.В. Коровчинский), Калужском политехническом институте (А.В. Емельянов), МГУ (Н.А. Слезкин), Челябинском политехническом институте (Г.А. Завьялов, Г.А. Левина, С.Г. Дадаев), Ростовском государственном университете (А.И. Снопов), в Николаевском кораблестроительном институте (А.М. Антонов, Я.Х. Сорока, А.И. Тарабрин) и в других организациях.

Наиболее значимые зарубежные разработки и исследования получены в: США (Mechanical Tehnology Inc.), Германии (Технический университет г. Лейпциг, Высшая техническая школа г. Аахен), Великобритании (Кембриджский университет), Польше (Технический университет г. Лодзь), Румынии (Институт прикладной механики) и другие.

Значительный вклад в развитие теории газовой смазки, разработку расчетных методик и проектирование газостатических опор внесли отечественные ученые. В работах Пинегина С. В. рассмотрены особенности конструирования, технологии изготовления и эксплуатации опор с газовой смазкой в узлах машин и приборов [90, 91]. Вопросами оптимизацией газостатических опор занимались

ученые под руководством Жедя В.П. В работах [89, 92] отмечаются перспективы промышленного применения подшипниковых узлов с газостатическими опорами.

Табачников Ю. Б. занимался исследованиями в области устойчивости газостатических опор [91, 92, 93]. Также значимые исследования провели Галанов Н.С. [94], Заблоцкий Н.Д. [95, 96], Степанянц Л.Г. [96], Баласаньян В. С. [97] и другие.

Из зарубежных исследователей занимающимся исследованиями газостатических опор следует выделить таких как Гриннелл С.К. [98], Константинеску В.Н. [99], Лауб Ж.Г. [100], Мори Х.А. [101], Лихт Л. [102], Дж. У. Пауэлл [103], А. Паттерсон [104] и другие.

Исследованию газостатических опор также посвящено большое количество изданий в которых публиковались работы отечественных и зарубежных ученых. Примером может служить «Проблемы трения и смазки», Американского общества инженеров-механиков (ASME), «Теоретические основы инженерных расчетов» и др.

В Политехническом институте СФУ (КГТУ, КрПИ) разработками в области газостатических опор занимались Шатохин С.Н. [105, 109, 112 и др.], Коднянко В.А. [106 – 117 и др.], Пикалова Ю.А. [106, 109, 112 – 114, 118 и др.], Курзаков А.С. [109, 112 – 116, и др.] и др.

1.4. Анализ исследований точностных характеристик гидро- и газостатических опор

Литературно-патентный анализ в области исследования гидростатических опор показал преимущества применения такого типа опор в испытательном оборудовании. Известно большое количество конструкций гидростатических опор, обладающих своими преимуществами для использования в других областях техники. Большая часть исследований и разработанных методик характеристики

опор предлагают определять по их номинальным размерам. Расчет характеристик газостатических опор, как для направляющих средств контроля, так и для другого оборудования, осуществляется так же по их номинальным размерам.

На практике действительные геометрические параметры опор отличаются от их номинальных значений и могут быть сопоставимы с важнейшими характеристиками опоры. Например, при плоском чистовом шлифовании несущих поверхностей опоры обеспечивается шероховатость по параметру R_a 1,6 мкм. При толщине несущего слоя в 20 мкм данная шероховатость составит порядка 30 % от его номинального значения. Примерно такой же процент отклонения от номинальной толщины несущего слоя может вызвать отклонения от плоскостности или отклонения от параллельности несущих поверхностей опор.

Кроме того, в процессе эксплуатации появляется целый ряд факторов, который вносит свою долю в искажение геометрии опорных поверхностей. Так на величину и форму несущего слоя влияют температурные и упругие деформации элементов опоры от действия сил давления смазки и внешних сил [51, 119], релаксации остаточных напряжений и ползучесть материала детали [120, 121].

Отсутствие методик нормирования допустимых геометрических параметров опор приводит к тому, при сборке опор используется метод неполной взаимозаменяемости: изготавливается партия опор, экспериментально оцениваются их характеристики, затем сортируют по группам с близкими характеристиками и осуществляют сборку по одноименным группам, что связано с непроизводственными затратами.

Известны отдельные исследования по выявлению влияния периодических погрешностей несущих поверхностей гидростатических опор на точностные характеристики опор [53, 57, 122, 123], но они не позволяют нормировать точность элементов опор при их проектировании и изготовлении.

Следовательно, исследование влияния отклонений геометрических параметров газостатических и гидростатических опор на их характеристики является актуальным направлением. Результаты работы позволят обеспечить

принцип полной взаимозаменяемости при проектировании направляющих с газостатическими и гидростатическими опорами, что экономически выгодно при создании средств контроля и испытательного оборудования.

1.5. Выводы по первой главе

На основании проведенных исследований газостатических и гидростатических опор установлено:

1. Совершенствование метрологических характеристик средств измерений и функциональных возможностей испытательного оборудования является актуальной задачей для ряда отраслей экономического развития как в нашей стране, так и за рубежом.

2. Одним из направлений повышения точности координатно-измерительных машин является использование в их направляющих газостатических опор, которые обладают преимуществами перед другими типами опор и хорошо себя зарекомендовали на практике.

3. Для повышения долговечности работы, повышения нагрузочных и скоростных характеристик в испытательном оборудовании применяются гидростатические опоры в качестве:

- гидростатических направляющих в вибрационных стендах и системах, обеспечивая минимальное трение и плавность перемещения подвижных частей устройств при испытаниях тяжелых и крупногабаритных изделий;

- шаровых шарниров со сферическими гидростатическими опорами, позволяющие создавать высокочастотные импульсные системы;

- актуаторов и приводов на гидростатических опорах, воспринимающих значительные осевые и радиальные нагрузки, в оборудовании при испытаниях на вибрацию, шум, растяжение, сжатие и т.п.

4. В измерительном оборудовании гидростатические опоры используются в качестве направляющих поворотных столов в крупногабаритных координатно-измерительных машинах либо в качестве опор в измерительных системах типа Talyrond или в других кругломерах.

5. В результате литературных исследований выявлено, что все методики расчета нагрузочных и расходных характеристик в качестве исходных данных используют номинальные размеры опор. Выявлены отдельные работы по влиянию отклонения расположения опорных поверхностей на точность вращения шпинделя в гидростатических опорах. Результаты исследований влияния геометрических отклонений (размеров, расположения, формы, шероховатости) на характеристики гидростатических опор не выявлены. Для газостатических опор аналогичные исследования также отсутствуют.

ГЛАВА 2. КРИТЕРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ПРЕЦИЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современный экономический менеджмент предъявляет особые требования к качеству выпускаемой продукции. Качество продукции относится к числу важнейших показателей, по которому оценивают, как деятельность предприятия, так и саму продукцию. Повышение качества продукции в значительной степени определяет удовлетворенность потребителя и выживаемость (успех) предприятия в условиях рыночных отношений.

От выпуска высококачественной продукции выигрывает не только товаропроизводитель, но и национальная экономика страны, поскольку это способствует импортозамещению и увеличению экспортного потенциала.

Качество является относительным мерилем товара. Оно фиксируется на конкретный период времени и изменяется при появлении более прогрессивной технологии. При оценке качества продукции необходимо сравнить свойства продукции с каким-то эталоном. Эталон, как правило, являются лучшие отечественные или зарубежные образцы аналогичной продукции. Но для оценки качества, в большинстве случаев, требуются показатели, которые позволяют в количественном или качественном представлении сделать определенное заключение или принять соответствующее решение. Количественная характеристика свойств продукции, составляющих ее качество, называется показателем качества продукции.

Каждая продукция обладает своей номенклатурой показателей, которая зависит от назначения продукции, условий её производства и эксплуатации и многих других факторов. Показатель качества может выражаться в различных физических единицах измерения (например, секунда, метр, кв. метр, куб. метр, км/ч, грамм, вольт, ватт, и др.), условных единицах измерения (балл, рубль, процент избирателей и др.), а также быть безразмерным (вероятность наступления

ожидаемого события, и др.) [85]. Совокупность показателей качества определяют их номенклатуру.

Показатели качества позволяют комплексно оценивать соответствие узлов, механизмов, машин и другого оборудования установленным требованиям эксплуатации. Кроме того, наличие показателей качества позволяет измерять отдельные характеристики изделия и своевременно проводить корректирующие действия во избежание поломок, и выхода из строя машины в целом.

Показатели качества должны отвечать следующим основным требованиям:

- способствовать обеспечению соответствия качества продукции потребностям потребителя;
- быть стабильными;
- учитывать современное состояние продукции на рынке, достижения науки и техники и др.;
- характеризовать все свойства продукции, обуславливающие ее пригодность удовлетворять потребности в соответствии с ее назначением;
- исключать дублирование показателей при комплексной оценке уровня качества продукции [85].

2.1. Анализ нормативной документации на показатели качества продукции

Показатели качества продукции приводятся в стандартах серии «Система показателей качества продукции (СПКП)» либо в стандартах на общие технические требования продукции, методы контроля продукции и др.

На первом этапе был проведён анализ стандартов серии СПКП на продукцию, которая по функциональному назначению близка к газостатическим и гидростатическим опорам и средствам измерения. Номенклатура показателей, приведенная в стандартах на анализируемую продукцию, представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1. – Показатели качества для различной продукции

Показатели:	Номер пункта показателя качества по ГОСТ:					
	4.154, 4.330 Машины электрические	4.37 Гидропривод	4.447, 4.449 Приборы контрольно-измерительные оптико-механические	4.137 Приборы полупроводниковые силовые	4.177 Приборы неразрушающего контроля	4.304 Аппаратура и приборы для измерения вибрации
<i>Оценочные</i>		2				
1. Назначения	1	2.1	1	1	1	1
<i>Классификационные</i>	1.1	1		1.1		
<i>Функциональные и технической эффективности</i>	1.2			1.2	1.1	
<i>Конструктивные</i>	1.3	2.2			1.2	
2. Надежности	2	2.3	2	2	2	2
<i>Безотказности</i>			2.1	2.1		
<i>Долговечности</i>			2.2		2.2	
<i>Ремонтопригодности</i>					2.3	
3. Технологичности,	5		6	4	6	6
4. Стандартизации и унификации	7		8	5	8	8
5. Эргономические	4	2.6	4		4	4
6. Эстетические			5		5	5
7. Транспортабельности	6		7		7	7
8. Патентно-правовые	8		9	6	9	9
9. Экологические						
10. Безопасности	9		10			10
<i>Экономного использования материала</i>	3	2.4		3	3	3
<i>Экономного использования энергии</i>	3	2.5		3		
<i>Экономические</i>			11		10	11

Названия стандартов, приведенных в таблице:

ГОСТ 4.154 СПКП. Машины электрические вращающиеся средние свыше 56 до 355 габарита включительно. Номенклатура показателей

ГОСТ 4.330 СПКП. Машины электрические вращающиеся малой мощности.

Номенклатура показателей

ГОСТ 4.37 СПКП. Гидроприводы объемные, пневмоприводы и смазочные системы.

Номенклатура показателей

ГОСТ 4.447 СПКП. Приборы контрольно-измерительные оптико-механические для измерения линейных размеров. Номенклатура показателей

ГОСТ 4.449 СПКП. Приборы контрольно-измерительные оптико-механические для контроля шероховатости и качества поверхности. Номенклатура показателей

ГОСТ 4.137 СПКП. Приборы полупроводниковые силовые. Номенклатура показателей

ГОСТ 4.177 СПКП. Приборы неразрушающего контроля качества материалов и изделий.

Номенклатура показателей

ГОСТ 4.304 СПКП. Аппаратура и приборы для измерения вибрации. Номенклатура показателей

Анализ показал, что в большинстве случаев основные группы показателей классифицируют по десяти группам свойств и показателей, приведенных в таблице 2.1.

В зависимости от специфики продукции количество групп показателей качества и их структура может отличаться от приведенной выше. Кроме того, одинаковые показатели могут находиться в разных классификационных группах, например, в ГОСТ 4.37 [124] классификационные и конструктивные показатели выведены из показателей назначения, а вновь введенные группы, например, оценочные (ГОСТ 4.37) или экономические (ГОСТ 4.447 [125]), не имеют общепринятых определений.

На отдельную продукцию стандарты серии СПКП отсутствуют, но требования к качеству могут приводиться в стандартах на продукцию, методы испытаний и др. Например, ГОСТ Р 55614-2013 «Контроль неразрушающий. Толщиномеры ультразвуковые. Общие технические требования» [126] приводит основные показатели качества в разделе «Технические требования» (рис. 2.1.). Структура показателей близка к структуре, установленной в СПКП.



Рисунок 2.1. – Структура стандарта ГОСТ Р 55614

Другим примером может служить ГОСТ ИСО 12301 «Подшипники скольжения. Методы контроля геометрических показателей и показателей качества материалов» [127]. Стандарт выделяет 23 геометрических показателя качества и 15 показателя качества материалов. На гистограмме (рис. 2.2.) показана применяемость показателей качества к различным типам подшипников скольжения.

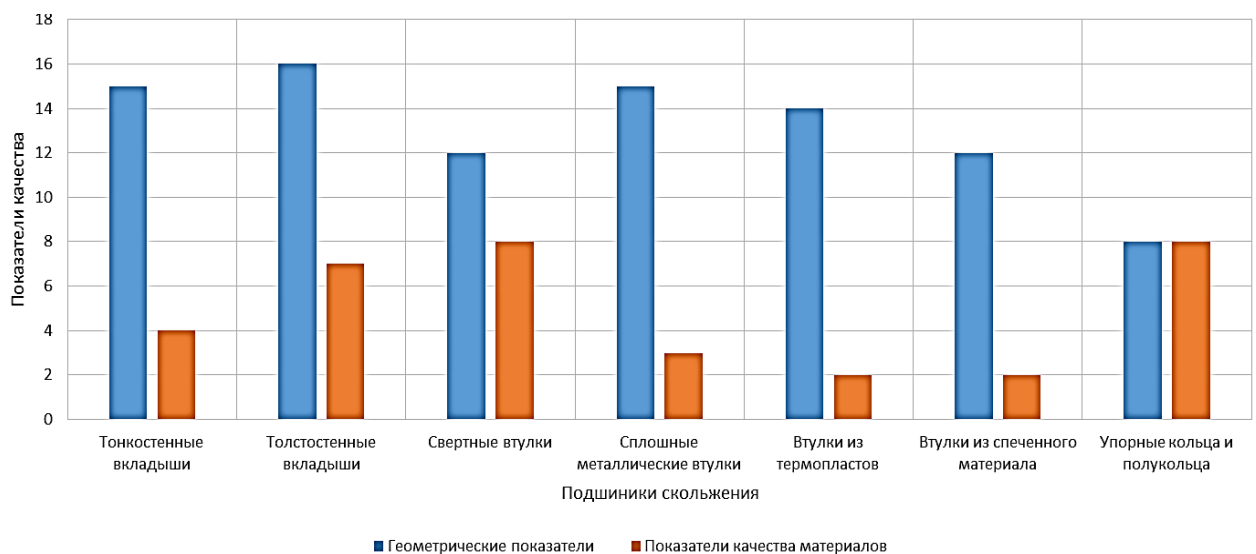


Рисунок 2.2. – Показатели качества подшипников скольжения

Рассмотрение ГОСТ ИСО 12301 показало, что показатели качества относятся для гидродинамических подшипников скольжения и их элементов. Кроме того, данный стандарт не учитывает такие важные показатели качества как надежности, технологичности, стандартизации и унификации, патентно-правовые. Показатели назначения определены лишь геометрическими показателями.

Таким образом, анализ нормативной документации показал, что только в рамках Системы показателей качества продукции действует около трехсот межгосударственных стандартов, охватывающих широкий круг продукции. Для ряда продукции показатели качества включены в стандарты на продукцию или методы испытаний.

На газостатические и гидростатические опоры нормативная документация, регламентирующая показатели качества, отсутствует.

2.2. Разработка показателей качества на газостатические и гидростатические опоры

Для разработки номенклатуры показателей качества газостатических и гидростатических опор принимаем следующие основные группы показателей:

1. Показатели назначения, характеризующие полезный эффект от эксплуатации изделия. В данную группу могут входить показатели классификационные, конструктивные, функциональные и показатели технической эффективности. Для газостатических и гидростатических опор принимаем:

1.1. Функциональные и показатели технической эффективности: номинальное давление смазки и его пульсация, статическая несущая способность, предельная частота вращения, затраты мощности при вращении вала, затраты мощности при прокачивании смазки (воздуха), расход смазки и как производная от него – вязкость смазки.

1.2. Конструктивные показатели: номинальный посадочный диаметр радиальной газостатической и гидростатической опоры, наружный диаметр упорной опоры, геометрические размеры и их отклонения остальных параметров опоры, шероховатость поверхностей, толщина несущего слоя смазки.

2. Показатели надежности характеризуют свойства объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров и требуемых функций. Надежность объекта включает четыре показателя: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. В зависимости от назначения продукции и условий ее применения могут использоваться как все, так и некоторые из указанных показателей.

2.1. *Безотказность* - это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого интервала времени. За показатель безотказности принимаем установленную безотказную наработку.

2.2 *Долговечность* - свойство изделия сохранять работоспособность до разрушения или другого предельного состояния. Принимаем установленный срок службы и полный средний срок службы.

2.3. *Ремонтоспособность* - это свойство изделия, выражающееся в его приспособленности к проведению операций технического обслуживания и ремонта. За показатель ремонтпригодности принимаем удельную суммарную трудоемкость технических обслуживаний.

2.4. *Сохраняемость* - это способность объекта сохранять свои свойства в определенных условиях. Сохраняемость играет важную роль для пищевой продукции, а для газостатических и гидростатических опор не актуальна, т.к. вращающиеся детали постоянно (как при вращении, так и без) разделены слоем смазки.

3. Показатели технологичности характеризуют эффективность конструкторско-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении и ремонте изделий. Именно с помощью технологичности обеспечивается массовость выпуска продукции, рациональное распределение затрат материалов, средств, труда и времени при технологической подготовке производства, изготовлении и эксплуатации изделий. В качестве технологических показателей приняты трудоемкость изготовления опоры и материалоемкость.

4. Показатели стандартизации и унификации характеризуют насыщенность продукции стандартными, унифицированными и оригинальными составными частями, а также уровень унификации по сравнению с другими изделиями. Все детали изделия делятся на стандартные, унифицированные и оригинальные. Чем больше стандартных и унифицированных деталей в изделии, тем лучше, как для производителя, так и для ее потребителя. Для газостатических и гидростатических опор принимаем коэффициент унификации по типоразмерам деталей.

5. Эргономические показатели отражают удобство эксплуатации изделия человеком. Взаимодействие человека с изделием выражается через комплекс

гигиенических, антропометрических, физиологических и психологических свойств человека. Это могут быть усилия, необходимые для управления трактором, автомобилем, расположение руля у велосипеда, освещенность, температура, влажность, запыленность, шум, вибрация, излучение и т.д. За эргономический показатель приняты уровень вибрации и уровень шума работы газостатических и гидростатических опор. В этом случае необходимо отдельно оценивать уровень шума гидростанции (компрессорной станции), которая, как правило, располагается отдельно и имеет свои показатели качества.

6. Эстетические показатели характеризуют композиционное совершенство изделия. Это рациональность формы, сочетание цветов, стабильность товарного вида изделия, стиль и т.д. Данные показатели отдельно не нормируются, т.к. газостатический и гидростатический опоры находится внутри узла. Эстетические показатели устанавливаются к узлу.

7. Показатели транспортабельности выражают приспособленность изделия для транспортировки различным транспортом без нарушения его свойств. К ним можно отнести устойчивость к воздействию транспортной тряски в упаковке и устойчивость к воздействию температуры и влажности в упаковке при транспортировке.

8. Патентно-правовые показатели характеризуют патентную защиту и патентную чистоту продукции и являются существенным фактором при определении конкурентоспособности. К ним относятся патентная защита и патентная чистота.

9. Экологические показатели отражают степень влияния вредных воздействий на окружающую среду, которые возникают при хранении, эксплуатации или потреблении продукции, например, содержание вредных примесей, вероятность выбросов вредных частиц, газов, излучений при хранении, транспортировании и эксплуатации продукции. Данные показатели отдельно для газостатических и гидростатических опор не устанавливаются.

10. Показатели безопасности определяют степень безопасности эксплуатации и хранения изделий, т.е. обеспечивают безопасность при монтаже, обслуживании, ремонте, хранении, транспортировании, потреблении продукции. Данные показатели отдельно для газостатических и гидростатических опор не устанавливаются [85].

Сводная номенклатура показателей качества газостатических и гидростатических опор приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2. – Показатели качества газостатических и гидростатических опор

№ 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
1.1.6	Вязкость смазки, Па·с	μ	Свойство смазки
1.1.7	Затраты мощности при вращении вала, кВт	N_b	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_z	Определяющий размер
1.2.5	Толщина несущего слоя смазки, мкм	h_0	

Окончание таблицы 2.2

№ п/п	Наименование показателя качества	Обозначение показателя	Наименование характеризующего свойства
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
2	Показатели надежности		
2.1	Установленная безотказная наработка, ч	T_v	Безотказность
2.2	Установленный срок службы, лет	$T_{сл.у}$	Долговечность
2.3	Полный средний срок службы, лет	$T_{сл.}$	Долговечность
3	Показатели технологичности		
3.1	Трудоемкость изготовления, нормо.ч	–	Трудоемкость изготовления
3.2	Материальность, кг	–	Эффективное использование материалов
4	Показатели стандартизации и унификации		
4.1	Коэффициент унификации по типоразмерам деталей, %	K_y	Насыщенность стандартами и унифицированными составными частями
5	Эргономические показатели		
5.1	Уровень шума, дБ	L	–
5.2	Уровень вибрации, дБ	N	Колебания механические
6	Показатели транспортабельности		
6.1	Устойчивость к воздействию транспортной тряски в упаковке	–	Приспособленность к транспортированию
6.2	Устойчивость к воздействию температуры и влажности в упаковке при транспортировании	–	Приспособленность к транспортированию
7	Патентно-правовые показатели		
7.1	Патентная защита	$П_{п.з.}$	–
7.2	Патентная чистота	$П_{п.ч.}$	–

Совокупность перечисленных показателей формирует качество газостатических и гидростатических опор.

Разработанная номенклатура показателей качества газостатических и гидростатических опор позволит:

1. Разработать проекта предварительного национального стандарта на газостатические и гидростатические опоры серии СПКП «Система показателей качества продукции. Подшипники газостатические и гидростатические. Номенклатура показателей».

2. Использовать предложенные показатели качества газостатических и гидростатических опор при разработке проектов национальных стандартов видов: конструкция и размеры; технические требования, методы испытаний и др.

3. Установить требования к газостатическим и гидростатическим опорам для проведения процедуры подтверждения их соответствия.

4. Устанавливать требования к качеству газостатических и гидростатических опор при разработке технических условий, технических заданий и др. аналогичных документов [85].

2.3 Выводы по второй главе

На основании проведенных исследований установлено:

1. Показатели качества являются важной характеристикой продукции. Показатели качества могут указываться в стандартах серии СПКП, в стандартах на общие технические требования и др. Они позволяют комплексно оценивать соответствие продукции установленным требованиям. Но на газостатические и гидростатические опоры нормативные документы отсутствуют.

2. Разработана система показателей качества на газостатические и гидростатические опоры, используемых в прецизионном оборудовании.

3. Предложен проект предварительного национального стандарта «СПКП. Подшипники газостатические и гидростатические. Номенклатура показателей».

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВАХ КОНТРОЛЯ

3.1. Особенности конструкций и проектирования газостатических опор в направляющих координатно-измерительных машинах

Разновидности газостатических опор, используемых в КИМ.

Газостатические опоры, как и другие типы опор с внешним источником давления нагнетания рабочей среды (гидростатические, реостатические), должны включать компенсатор расхода воздуха. Наибольшее применение получили опоры с пассивной компенсацией расхода воздуха, в которых роль компенсатора расхода выполняет дроссель постоянного сопротивления. В опорах с активной компенсацией расхода смазки в качестве компенсатора используются регуляторы расхода воздуха.

В средствах измерений, как правило, используются опоры с пассивной компенсацией расхода воздуха. В свою очередь компенсаторы расхода разнообразны по конструкции, имеют свои преимущества и недостатки.

Кроме того, опоры условно можно разделить на подшипники (радиальные и осевые) и направляющие. Условность такого деления заключается в том, что в шпиндельном узле одна и та же опора может выполнять функции осевого подшипника, а в направляющих – вкладыша [2].

В координатно-измерительных машинах газостатические опоры в основном выполняют функции направляющих. Хотя радиальные газостатические подшипники тоже могут быть использованы, например, в конструкциях поворотных столов КИМ-П384, КИМ-П396, КИМ-П397, КИМ-ТВ500 и КИМ-ТВ800 [128]. Прецизионное вращение поворотного стола обеспечивают радиальные сегментные газостатические опоры (рис. 3.1). Подвод воздуха осуществляется через отверстия диаметром 4 мм в центральную часть сегмента. Роль дросселя выполняют дренажные канавки, выполненные по площади

сегмента. Размеры сечения канавки для конкретной опоры приведены в сечении А-А.

Плоские круговые газостатические опоры воспринимают вес контролируемой детали и исключают торцевое биение центра. Надежная и простая в эксплуатации конструкция газостатических опор позволяет обеспечить радиальное и торцевое биение поворотного стола в пределах (0,3 – 0,5) мкм [2, 118].

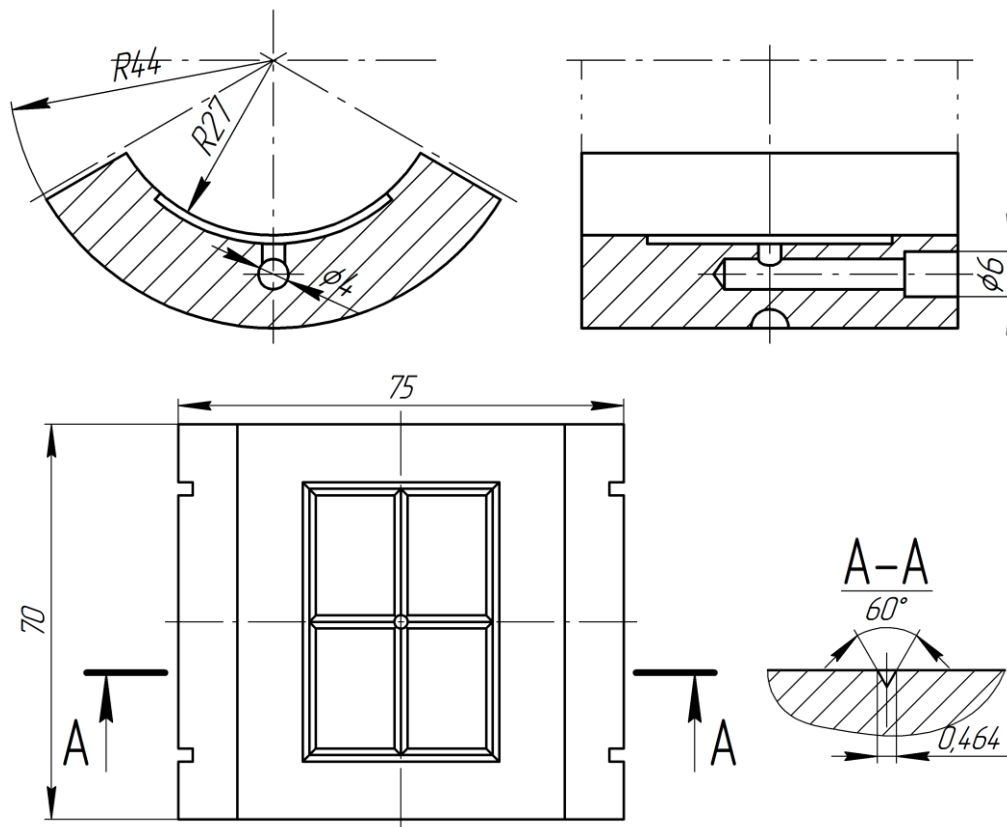


Рисунок 3.1. – Радиальная сегментная газостатическая опора [2,128]

Возможны разные компоновки газостатических направляющих. Как правило, это прямоугольные, квадратные или круглые вставки, закрепленные на подвижных элементах направляющих. Они могут обеспечивать полный замкнутый контур, располагаясь с четырех сторон относительно неподвижного элемента направляющих (рис. 3.2, а). Так обычно выполняют газостатические направляющие пиноли КИМ, которая перемещается вертикально [128]. В других случаях это могут быть направляющие типа «ласточкин хвост» (рис. 3.2, б).

Вставки можно устанавливать и на неподвижном звене, например, корпус пиноли. В этом случае следует предусмотреть, чтобы не было обнажения вставок и потери несущей способности опоры при перемещении подвижного узла в крайнее положение.

Вставки газостатических направляющих могут быть различные не только по внешнему виду или габаритным размерам, но и по конструкции компенсаторов расхода и формы течения воздуха в тонком несущем слое опоры. Рассмотрим наиболее часто встречаемые конструкции [2].

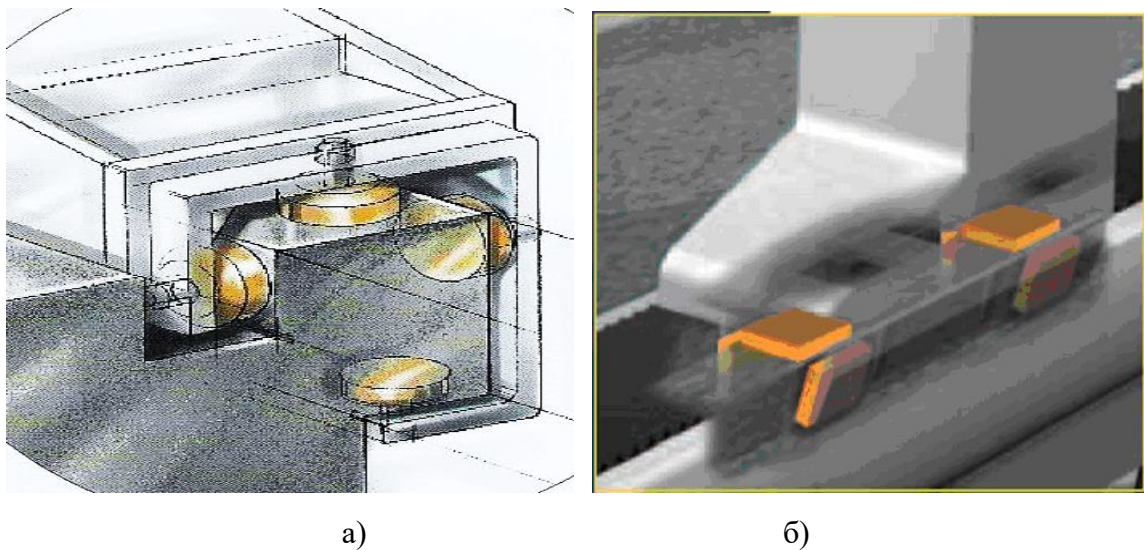


Рисунок 3.2. – Конструктивные схемы газостатических направляющих в КИМ [2]:

- а) расположение опор прямоугольной замкнутой направляющей;
- б) расположение опор в направляющей типа «ласточкин хвост»

Опоры с пористыми компенсаторами расхода воздуха. Такие опоры могут быть выполнены целиком из пористого материала [128] или иметь пористые вставки – опоры с наддувом через частично пористую опорную поверхность [129] или опоры с пористым дросселем [130]. Внешний вид пористых опор показан на рис. 3.3.

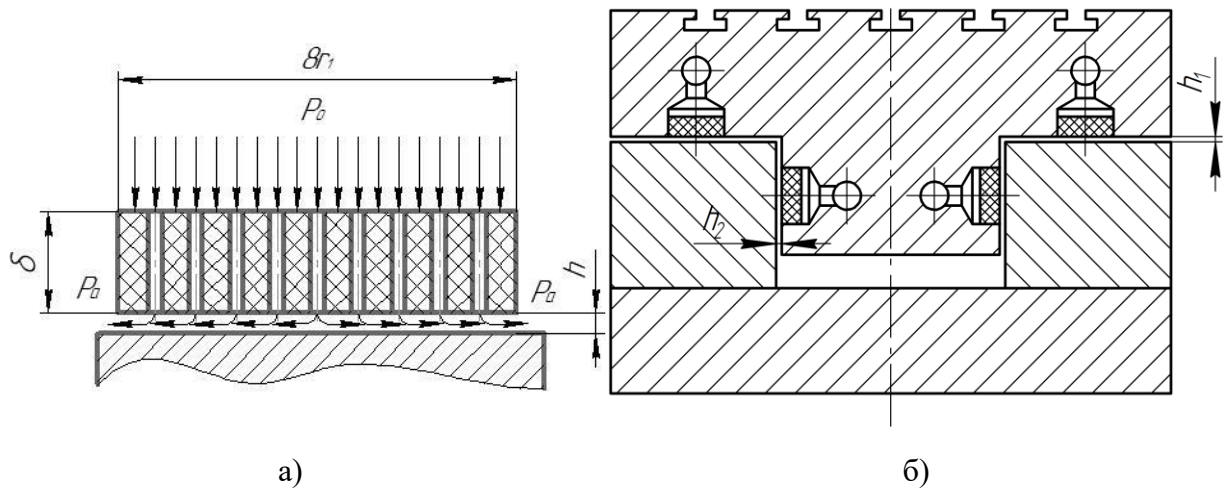


Рисунок 3.3. – Расчетная (а) и конструктивная (б) схемы пористых опор [128,129]

Пористая поверхность опоры (или вставки) состоит из большого количества мельчайших капилляров, через которые сжатый воздух подается на всю рабочую поверхность. Отсутствие карманов приводит к уменьшению объема воздуха в рабочей зоне, что снижает вероятность появления вибраций и потери устойчивости в работе опоры. Этому же способствует и то, что пористая поверхность опоры полностью поглощает энергию вынужденных колебаний в случае их возникновения.

Опоры такого типа обладают более высокой несущей способностью и малой податливостью. Несущая способность повышается за счет более благоприятной формы эпюры распределения давления в несущем слое и отсутствия свободных объемов сжатого воздуха [118].

В качестве пористого материала в газостатических опорах чаще всего применяют спеченный графит [131] или бронзографит [132]. Кроме того, могут применяться спеченные металлические порошки, модифицированная древесина березы [133] и другие материалы.

Пористый графит является распространенным антифрикционным материалом и легко поддается обработке. Однако он, как и все перечисленные выше материалы обладает существенной неоднородностью проницаемости, которая носит случайный характер и должна учитываться при расчете характеристик газостатических опор.

Кроме того, пористый материал изменяет свои свойства в процессе эксплуатации опор от внешних влияющих факторов, недостаточной очистки подаваемого воздуха и др.

Опоры с микроканавками. Вставки газостатических направляющих с микроканавками могут иметь плоскую или цилиндрическую форму. Внешний вид и конструкция таких вставок приведена на рис. 3.4 и рис. 3.5. Эти опоры имеют тщательно доведенные рабочие поверхности. Наддув воздуха осуществляется через отверстия малого диаметра (0,2 – 0,4 мм), соединенные микроканавками в секции [2, 128].

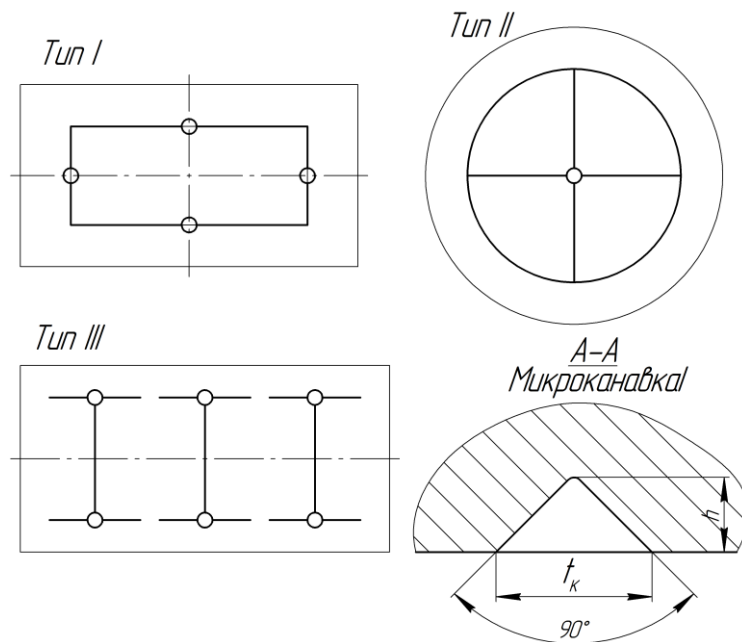


Рисунок 3.4. – Конструкции и основные размеры прямоугольных и круглых газостатических опор [128]



Рисунок 3.5. – Внешний вид круговых и прямоугольных газостатических опор [128]

Для расчета статических характеристик таких опор обычно используют численные методы, основанные на замене исходного дифференциального уравнения, определяющего распределение давления в опоре, системой конечно-разностных уравнений. Рекомендаций по проектированию таких опор и выбору параметров не выявлено.

Поэтому помимо расчетов после изготовления опоры испытываются на специальном стенде. После испытаний опоры сортируются по характеристикам жесткости и подбираются для установки в каретки с примерно одинаковыми характеристиками [2, 128].

Газостатические опоры с двойным дросселированием расхода воздуха. В опорах с двойным дросселированием смазки (рис. 3.6) в магистрали нагнетания последовательно расположены основное дросселирующее сопротивление (d_p – простая диафрагма), и дополнительные дросселирующие сопротивления (d_k – кольцевая диафрагма) на входе в несущий слой h , предназначенные для распределения воздуха по площади несущего слоя и выполняющие функцию демпфера вибраций [134]. Данный способ двойного дросселирования был разработан Красноярском политехническом институте [106].

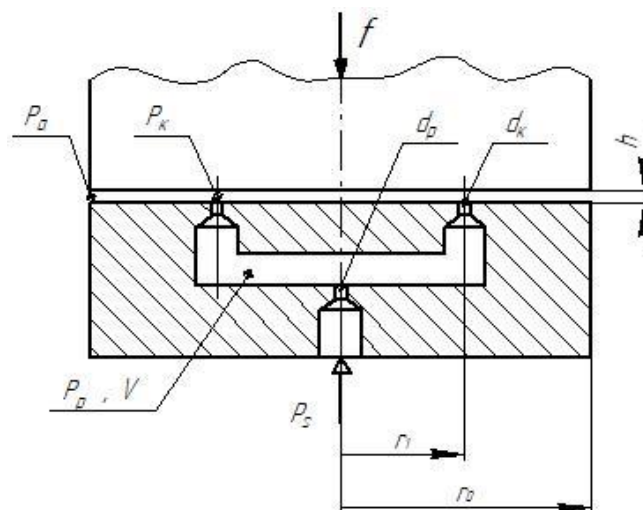


Рисунок 3.6. – Газостатическая опора с двойным дросселированием воздуха в магистрали нагнетания

Исследования двойного дросселирования в газостатических опорах [134 – 136] показали, что данный способ дросселирования значительно улучшает динамические характеристики газостатических опор, повышает устойчивость опоры при отрицательной податливости.

Установлено, что наилучшие характеристики газостатическая опора с дросселирующими соплами будет иметь при $d_k = 1,5 \cdot d_0^2/h$ и $h+t_k > 1,5 \cdot d_0$ (t_k – это ширина микроканавки, глубина которой равна толщине несущего слоя h) В этом случае 70÷80 % сопротивления сопел создают простые диафрагмы на входе карманов, а остальные 20÷30 % создают кольцевые диафрагмы на входе и выходе карманов, то есть происходит двойное внешнее дросселирование. Карманы при этом являются междроссельными камерами, объем которых экстремально влияет на динамическое качество опоры. Степень устойчивости опоры с двойным внешним дросселированием максимальна, если суммарный объем карманов составляет 0,4÷0,9 от объема несущего слоя [118, 136]. При одинаковом давлении нагнетания воздуха нагрузочные характеристики такой газостатической опоры лишь на 5÷10 % хуже, чем у опоры с простыми диафрагмами, но ее динамическое качество выше, чем у опоры с кольцевыми диафрагмами. Поэтому, если исходить из требуемого динамического качества, то при обычно используемом давлении нагнетания ($p_s > 3÷4$ МПа) можно получить у опоры с двойным дросселированием нагрузочные характеристики даже лучше, чем у опоры с простыми диафрагмами. Кроме того, в опоре с двойным дросселированием за счет оптимальной формы междроссельных камер число простых диафрагм может быть в 3÷4 раза меньше числа кольцевых диафрагм. Это позволяет в 1,5÷2 раза увеличить диаметр простых диафрагм, что существенно упрощает их изготовление и снижает вероятность засорения [2].

По результатам литературно-патентного анализа в области конструкций газостатических опор, используемых в направляющих КИМ, в качестве объекта дальнейшего исследования принимаем круглую газостатическую опору с двойным дросселированием в магистрали нагнетания.

Данный тип опор достаточно полно исследован в области расходных и нагрузочных характеристик, даны рекомендации по выбору сопротивлений основного и дополнительного дросселирующих устройств, исследована устойчивость опоры, даны рекомендации по проектированию газостатических опор.

Однако все исследования, расчеты и рекомендации по проектированию газостатических опор приведены для номинальных параметров опор. Исследований по влиянию отклонений геометрических параметров на характеристики газостатических опор не выявлены. Следовательно, в качестве предмета дальнейших исследований приняты геометрические показатели качества (отклонения размеров, погрешности формы и расположения, шероховатости) газостатических опор, используемых в направляющих КИМ.

3.2. Математическая модель газостатической опоры с двойным регулированием

Математическая модель газостатической опоры с двойным дросселированием (см. рис. 3.6) 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. Ниже приведены составляющие математической модели, используемые при всех дальнейших исследованиях.

Массовый расход воздуха через простую диафрагму определяется по формуле [91]

$$q_p = \frac{C_p \Gamma \pi d_p^2}{4\sqrt{\Re T}} \Pi(p_s, p_p), \quad (3.1)$$

где $C_p = 0,8$ – поправочный коэффициент [91],

$$\Gamma = 2\sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \text{ для воздуха, } \gamma = 1.4 \text{ – показатель адиабатического}$$

расширения воздуха,

d_p – диаметр диафрагмы,

\mathfrak{R} – универсальная газовая постоянная,

T – абсолютная температура газа,

p_s – давление наддува абсолютное,

p_p – давление в междроссельной камере,

$$\Pi(p_1, p_2) = \begin{cases} \sqrt{(p_1 - p_2)p_2}, & p_2 \geq 0.5p_1, \\ 0.5p_1 & p_a \leq p_2 \leq 0.5p_1 \end{cases} \text{ – функция истечения Прандтля [91],}$$

где p_a – давление окружающей среды.

Формула массового расход через кольцевые диафрагмы имеет вид

$$q_k = \frac{C_k \Gamma n_k \pi d_k h}{\sqrt{\mathfrak{R}T}} \Pi(p_p, p_k), \quad (3.2)$$

где $C_k = 0.8$ – поправочный коэффициент, учитывающий дискретность наддува [91],

n_k – количество отверстий на линии наддува,

d_k – диаметр отверстий,

h – толщина смазочного слоя,

\mathfrak{R} – универсальная газовая постоянная,

T – абсолютная температура газа,

p_k – давление на входе кольцевых диафрагм.

Несущая способность опоры определяется формулой

$$w = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_0} r(p - p_a) dr, \quad (3.3)$$

где $p(r)$ – функция распределения давления в смазочном слое опоры.

В стационарном режиме давление в слое смазки подчиняется краевой задаче для дифференциального уравнения Рейнольдса

$$\begin{cases} \frac{d}{dr} \left(rh_s^3 p \frac{dp}{dr} \right) = 0, \\ \frac{dp}{dr}(0) = 0, p(r_1) = p_k, p(r_0) = p_a. \end{cases} \quad (3.4)$$

Для проведения оптимизации эксплуатационных характеристик опоры, которая состоит в расчете оптимальной по податливости конструкции, приведем математическую модель к безразмерному виду.

Выберем в качестве масштабов 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), $\frac{\pi h_0^3 p_a^2}{12\mu \Re T}$ – для массовых расходов, $\pi r_0^2 p_a$ – для сил, в частности, для несущей способности.

Тогда безразмерный расход в слое смазки будет равен

$$Q_h = \frac{H^3 (1 - P_k^2)}{\ln R_1}, \quad (3.5)$$

где $R_1 = r_1/r_0$ – безразмерный радиус окружности, на которой расположены питающие опору отверстия,

H и P_k – безразмерные зазор и давление на выходе кольцевых диафрагм.

После приведения к безразмерному виду расход через простые и кольцевые диафрагмы примет вид

$$Q_p = A_p \Pi(P_s, P_p), \quad (3.6)$$

$$Q_k = A_k H \Pi(P_p, P_k), \quad (3.7)$$

где

$$A_p = \frac{3\mu C_p \Gamma d_p^2 \sqrt{\Re T}}{p_a h_0^3}. \quad (3.8)$$

$$A_k = \frac{12\mu C_k \Gamma n_k d_k \sqrt{\Re T}}{p_a h_0^2}. \quad (3.9)$$

Данные элементы математической модели необходимы для расчета параметров основного и вспомогательных дросселирующих устройств и определения эксплуатационных характеристик, а также для исследования влияния отклонений геометрических параметров на характеристики газостатических опор.

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.

3.3. Определение параметров дросселей и эксплуатационных характеристик газостатической опоры

Для настройки параметров дросселей газостатической опоры на расчетную нагрузку и расчетный зазор смазочного слоя введем нормированный коэффициент настройки сопротивлений системы внешнего двойного дросселирования

$$\chi = \frac{P_{k0}^2 - 1}{P_s^2 - 1} \in [0, 1], \quad (3.10)$$

где P_{k0} – безразмерное давление P_k при расчетном безразмерном зазоре $H = 1$.

Зададим безразмерное давление наддува P_s и значение параметра χ в диапазоне его изменения $\chi \in (0,1)$. Используя (3.10), найдем настроечное безразмерное давление

$$P_{k0} = \sqrt{\chi(P_s^2 - 1) + 1}. \quad (3.11)$$

Добавим коэффициент настройки демпфирующих дросселей

$$\zeta = \frac{P_{p0}^2 - P_{k0}^2}{P_s^2 - P_{k0}^2} \in [0,1]. \quad (3.12)$$

Если $\zeta = 0$, то $P_{k0} = P_{p0}$, что равносильно отсутствию кольцевых диафрагм и одинарному дросселированию через простую диафрагму диаметра d_p . Если $\zeta = 1$, то $P_s = P_{p0}$ и это соответствует режиму одинарного дросселирования через кольцевые диафрагмы диаметра d_k . Следовательно, двойное дросселирование будет иметь место при $0 < \zeta < 1$.

При малых ζ большее сопротивление приходится на простую диафрагму, при ζ близких к 1, наоборот главную роль будут играть кольцевые диафрагмы. Исследования показывают, что наилучшими, как по качеству статики, так и динамики, являются значения $\zeta \in [0,2; 0,3]$.

Найдем параметры расчетного режима, при котором $H = 1$. Для этого запишем систему баланса расходов (3.5), (3.6), (3.7)

$$\begin{cases} Q_h = Q_k, \\ Q_k = Q_p \end{cases} \quad (3.13)$$

или

$$\begin{cases} A_h (P_{k0}^2 - 1) = A_k \Pi(P_{p0}, P_{k0}), \\ A_k \Pi(P_{p0}, P_{k0}) = A_p \Pi(P_s, P_{p0}), \end{cases} \quad (3.14)$$

где $A_h = \frac{-1}{LnR_1}$.

Задав P_s, R_1, χ, ζ , по формуле (3.11) найдем P_{k0} . Далее из формулы (3.12) найдем безразмерное давление в междроссельной камере

$$P_{p0} = \sqrt{\zeta P_s^2 + (1 - \zeta) P_{k0}^2}. \quad (3.15)$$

Теперь из (3.14) можно найти коэффициенты

$$A_k = \frac{A_h (P_{k0}^2 - 1)}{\Pi(P_{p0}, P_{k0})}, A_p = \frac{A_h (P_{k0}^2 - 1)}{\Pi(P_s, P_{p0})}. \quad (3.16)$$

После их вычисления можно найти диаметры диафрагм. Для этого, используя формулу (3.8), получим

$$d_p = h_0 \sqrt{\frac{A_p P_a h_0}{3\mu C_p \Gamma \sqrt{\Re T}}}. \quad (3.17)$$

Используя формулу (3.9), найдем

$$d_k = \frac{A_k P_a h_0^2}{2\mu C_k \Gamma n_k \sqrt{\Re T}} \quad (3.18)$$

Используя ранее приведенные масштабы величин, приведем краевую задачу (3.4) к безразмерному виду

$$\begin{cases} \frac{d}{dR} \left(R H_s^3 \frac{dP^2}{dR} \right) = 0, \\ \frac{dP^2}{dR} (0) = 0, P^2(R_1) = P_k^2, P^2(1) = 1, \end{cases} \quad (3.19)$$

Найдем решение задачи (3.19) для круга $R \in [0, R_1]$

$$R H_s^3 \frac{dP^2}{dR} = C_1, \quad (3.20)$$

где C_1 – неизвестная константа.

Из первого граничного условия следует, что $C_1 = 0$, следовательно

$$\frac{dP^2}{dR} = 0. \quad (3.21)$$

Интегрируя (3.21) и применив первое и второе граничное условие (3.19), получим

$$P^2(R) = P_k^2. \quad (3.22)$$

Это означает, в частности, что в области $R \in [0, R_1]$ функция распределения давления постоянна и не зависит от зазора H_s .

Найдем решение задачи (3.19) для кольца $R \in [R_1, 1]$. Интегрируя уравнение, получим

$$RH_s^3 \frac{dP^2}{dR} = C_1 \quad (3.23)$$

или

$$\frac{dP^2}{dR} = \frac{C_1}{RH_s^3}. \quad (3.24)$$

Применим к (3.24) интегрирование по переменному верхнему пределу, получим

$$\int_{R_1}^R \frac{dP^2}{dR} dR = C_1 \int_{R_1}^R \frac{dR}{RH_s^3}. \quad (3.25)$$

После интегрирования (3.25) найдем

$$P^2(R) - P_k^2 = C_1 \int_{R_1}^R \frac{dR}{RH_s^3}. \quad (3.26)$$

Подставив в (3.26) последнее граничное условие задачи (3.19), найдем

$$1 - P_k^2 = C_1 \int_{R_1}^1 \frac{dR}{RH_s^3}. \quad (3.27)$$

Отсюда следует, что неизвестная константа C_1 равна

$$C_1 = \frac{1 - P_k^2}{\int_{R_1}^1 \frac{dR}{RH_s^3}}. \quad (3.28)$$

Подставив (3.28) в (3.26), найдем решение задачи (3.19) для кольца $R \in [R_1, 1]$

$$P^2(R) = P_k^2 + (1 - P_k^2) \frac{\int_{R_1}^R \frac{dR}{RH_s^3}}{\int_{R_1}^1 \frac{dR}{RH_s^3}}. \quad (3.29)$$

Видно, что на кольце функция распределения давления зависит от функции зазора.

Запишем решение (3.29) в более удобном для расчетов виде

$$P^2(R) = P_k^2 + \frac{1 - P_k^2}{I(1)} I(R), \quad (3.30)$$

где интеграл

$$I(R) = \int_{R_1}^R \frac{dR}{RH_s^3}. \quad (3.31)$$

При $R > R_1$ интеграл (3.31) нельзя выразить аналитической функцией, поэтому получить его значение можно только численно, например, с помощью часто применяемого на практике параболического метода Симпсона [137].

С учетом (3.22), (3.31) общее решение задачи (3.19) теперь можно записать в виде

$$P^2(R) = \begin{cases} P_k^2, & R \in [0, R_1], \\ P_k^2 + \frac{1 - P_k^2}{I(1)} I(R), & R \in [R_1, 1]. \end{cases} \quad (3.32)$$

В частности, размерным аналогом (3.32) является формула

$$p(r) = \begin{cases} p_k, & r \in [0, r_1], \\ \sqrt{p_k^2 + \frac{p_a^2 - p_k^2}{I(1)} I\left(\frac{r}{r_0}\right)}, & r \in [r_1, r_0], \end{cases} \quad (3.33)$$

С учетом (3.3) и (3.33) выражение для размерной несущей способности примет вид

$$\begin{aligned} w &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_0} r(p - p_a) dr = \\ &= \pi r_1^2 (p_k - p_a) + 2\pi \int_{r_1}^{r_0} r \left(\sqrt{\left(p_k^2 - p_a^2 \right) \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + p_a^2 - p_a} \right) dr = \\ &= \pi \left[r_1^2 p_k + 2 \int_{r_1}^{r_0} r \sqrt{\left(p_k^2 - p_a^2 \right) \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + p_a^2} dr - r_0^2 p_a \right]. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Согласно (3.3) формулу для безразмерной несущей способности подпятника можно записать в виде

$$W = \int_0^1 R(P-1) dR. \quad (3.35)$$

Размерные нагрузочные характеристики исследуемой газостатической опоры приведены на рис. 3.7, 3.8 в виде графических зависимостей. На рис. 3.7 показаны зависимости толщины несущего слоя h от внешней нагрузки f при различных значениях давления нагнетания p_s при расчетном зазоре $h_0 = 20$ мкм.

На рис. 3.8 показаны зависимости внешней нагрузки f от диаметра дросселирующего сопла d_p при различных значениях давления нагнетания p_s . Из графика видно, что при увеличении давления нагнетания p_s в зависимости от

диаметра дросселирующей диафрагмы d_p несущая способность и, следовательно, соответствующая внешняя нагрузка увеличиваются.

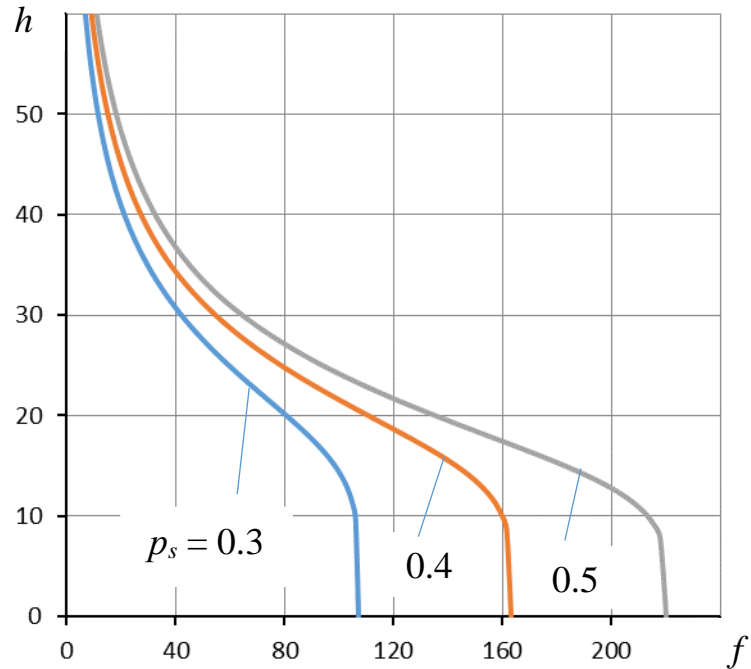


Рисунок 3.7. – Зависимости толщины несущего слоя h (мкм) от внешней нагрузки f (Н) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа)

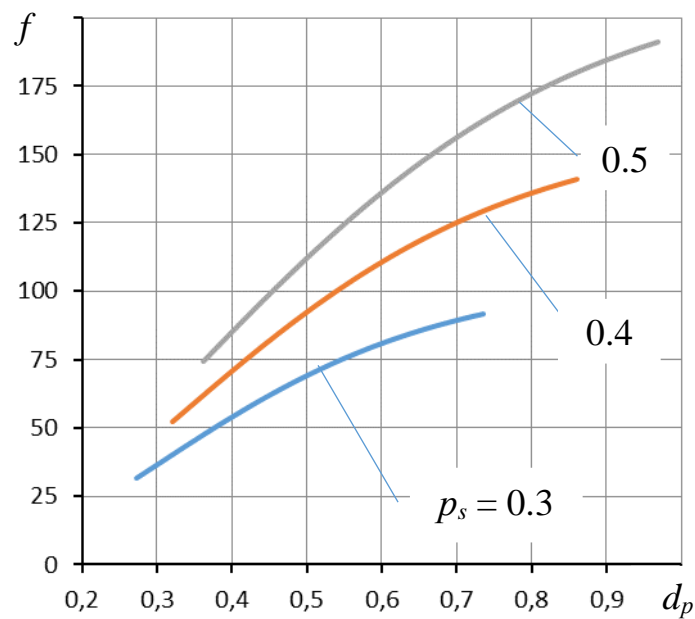


Рисунок 3.8 – Зависимости внешней нагрузки f (Н) от диаметра дросселирующего сопла d_p (мм) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа)

Данные зависимости позволяют выбрать оптимальные параметры газостатической опоры. 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 (рис. 3.7). Для обеспечения расчетных параметров диаметр дросселирующих сопел должен соответствовать $d_p = 0,6$ мм (рис. 3.8). При одинаковых размерах опоры несущую способность можно увеличить за счет увеличения давления нагнетания либо за счет уменьшения толщины несущего слоя. Например, при давлении нагнетания 0,5 Мпа и толщине несущего слоя в 20 мкм несущая способность увеличится до 130 Н. Диаметр дросселирующих сопел при этом практически не изменится.

3.4. Влияние отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные характеристики

При проектировании газостатической опоры проводят расчеты параметров и характеристик по номинальным значениям. К геометрическим параметрам опоры с двойным дросселированием можно отнести наружный радиус r_0 (см. рис. 3.6), радиус расположения питателей r_1 , диаметры самих питателей d_p [117].

При изготовлении элементов газостатической опоры ее действительные размеры отличаются от номинальных значений. Рассмотрим влияние отклонений основных размеров опоры на точность позиционирования ее подвижной части.

Влияние отклонения размеров наружного диаметра на положение подвижной части опоры. Вследствие погрешностей изготовления опоры величина наружного радиуса r_0 отличается от расчетной. При этом, очевидно, будут отличаться от расчетных значений безразмерные величины внутреннего радиуса R_1 , давления P_k на выходе питателей и зазора H . С учетом этого радиус расположения питателей теперь будет определяться формулой $R_{1R} = r_1/r_{0R}$, где r_{0R}

– реальный радиус подпятника. Будем считать, что нагрузка f на подпятник остается неизменной и ее величина определяется расчетом при $r_{0R} = r_0$.

Запишем размерное уравнение баланса сил в следующем виде

$$2r_{0N}^2 p_a \int_0^1 R(P-1) dR = f. \quad (3.36)$$

В этом уравнении неизвестно лишь безразмерное давление P_k . Найдем его методом половинного деления [138]. Границы интервала неопределенности определим из очевидного условия $P_k \in [1, P_s]$.

Вычислив давление P_k , найдем далее измененный зазор H . Поскольку параметр настройки ζ мал, то можно считать, что давления на выходе питателей примерно равны $P_p \approx P_k$. В этом случае уравнение баланса расходов можно записать в виде

$$Q_h = Q_p, \quad (3.37)$$

где

$$Q_p = A_p \Pi(P_s, P_k), \quad (3.38)$$

$$Q_h = A_h H^3 (P_k^2 - 1). \quad (3.39)$$

Здесь Q_h, Q_p – безразмерные массовые расходы смазки через несущий слой и дроссель, A_h, A_p – безразмерные критерия подобия гидравлического сопротивления несущего слоя и дросселя.

Из уравнения баланса расходов (3.37) можно получить зависимость безразмерного H и размерного h зазоров от давления P_k

$$H = \sqrt[3]{\frac{A_p \Pi(P_s, P_k)}{A_h (P_k^2 - 1)}}, h = h_0 H. \quad (3.40)$$

Результаты расчета представлены на рис. 3.9. Расчеты были проведены для трех типоразмеров опор с номинальными значениями наружных радиусов: 25 мм

(рис. 3.9, а), 50 мм (рис. 3.9, б) и 75 мм (рис. 3.9, в). Для каждой опоры расчеты выполнены для трех номинальных значений зазоров 10, 20 и 30 мкм.

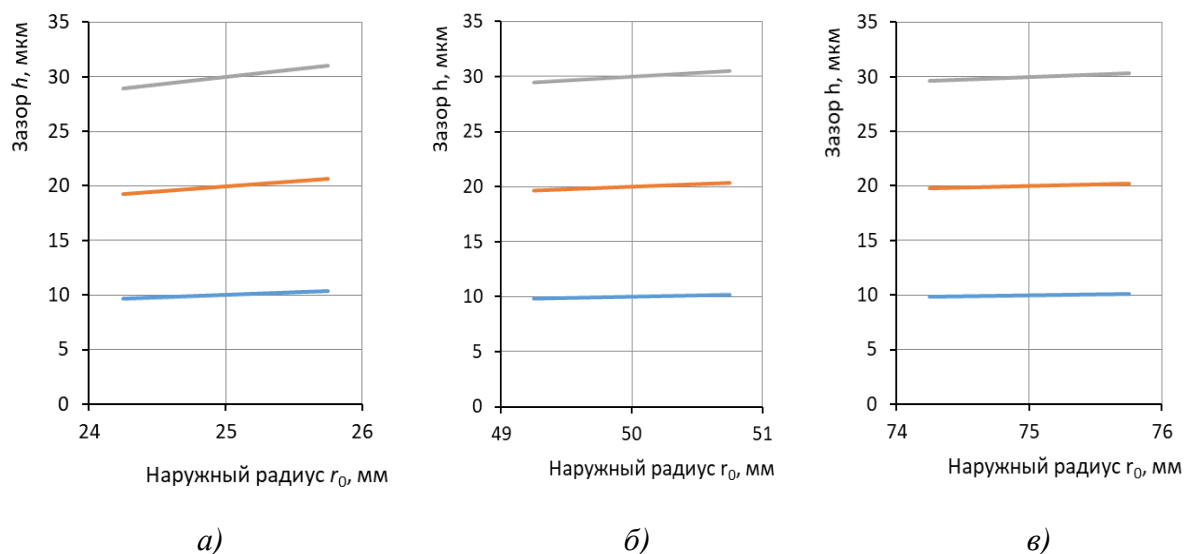


Рисунок 3.9. – Влияние отклонений размера наружного радиуса r_0 (мм) на зазор h (мкм) в опоре при различных значениях номинального зазора h_0 (мкм)

При теоретическом исследовании использовали радиус наружной поверхности. На рабочих чертежах указывается номинальный диаметр и его предельные отклонения. Наружный диаметр опоры относится к свободным (несопрягаемым) размерам, которые изготавливаются по 12 – 16 квалитетам точности. Исследования показали, что изменение наружного диаметра в пределах допуска по 12 квалитету повлечет за собой изменение зазора в пределах 1 % от номинального значения, а нормирование наружного диаметра по 16 квалитету – от 6 – до 8 %. При номинальной величине зазора в 20 мкм 8 % в отклонении наружного диаметра изменит точность позиционирования подвижной части, например, координатно-измерительной машины на 1,6 мкм, что недопустимо для прецизионного измерительного оборудования.

По результатам исследования рекомендуем для нормирования точности наружного диаметра газостатических опор использовать 14 квалитет точности, который относится к среднему условному классу точности, широко используется в машиностроении и приборостроении для нормирования точности свободных

размеров. В сравнении с 16 квалитетом точности 14 квалитет позволит в два и более раз повысить точность позиционирования подвижной части опоры без существенного увеличения стоимости изготовления в связи с отсутствием необходимости использования при изготовлении опоры технологического оборудования повышенной точности.

Влияние погрешности радиуса расположения осей отверстий питателей газостатической опоры на величину расчетного зазора. На несущей поверхности газостатической опоры с двойным дросселированием (как и для других типов газостатических опор) выполняются отверстия питателей (дросселей), которые расположены по заданному радиусу опоры через определенный угловой размер. Допуски на расположение осей отверстий регламентирует ГОСТ 14140-81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски расположения осей отверстий для крепежных деталей» [139], который предназначен для обеспечения взаимозаменяемости двух соединяемых поверхностей и для данного случая не подходит. Рекомендации данного стандарта распространяются только для крепежных деталей и не позволяют использования их для нормирования точности расположения осей отверстий питателей газостатической опоры.

Точность положения угловых координат отверстий питателей практически не влияет на результаты исследования исходя из допущений, которые были приняты в математической модели опоры. Для влияния радиальной составляющей были проведены дополнительные исследования. Для этого наружный радиус принимался в качестве постоянной величины, а изменялся радиус расположения осей отверстий питателей газостатической опоры варьировали в пределах 11 - 14 мм (для опоры с наружным диаметром 25 мм см. рис. 3.10) [117].

При математическом моделировании и расчетах изменяли значение радиуса расположения питательных отверстий r_1 . Это повлекло за собой отличие от расчетных значений безразмерных величин давления P_k и зазора H . С учетом этого радиус расположения осей отверстий питателей определяется по формуле

$R_{1R} = r_{1R} / r_0$, где r_{1R} – реальный внутренний радиус. Уравнение баланса сил примет вид

$$2r_0^2 p_a \int_0^1 R(P-1) dR = f. \quad (3.41)$$

Вычислив по описанной методике неизвестное давление P_k , находили зазоры по формуле (3.40). Результаты расчетов представлены на рис. 3.10.

Анализ показал, что при проектировании газостатической опоры допуски на диаметр расположения осей питательных отверстий необходимо назначать по 14 качеству, как и для наружного диаметра опоры.

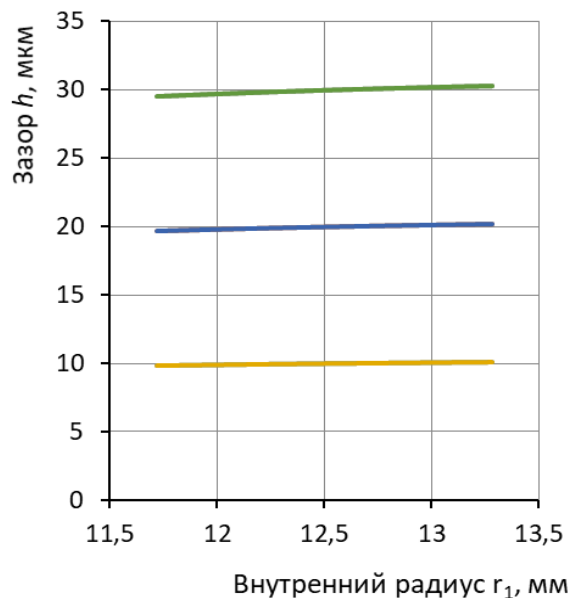


Рисунок 3.10 – Зависимость изменения толщины несущего слоя h (мкм) в газостатической опоре от изменения радиуса расположения питательных отверстий r_1 (мм) при различных значениях номинального зазора h_0 (мкм)

Влияние погрешности диаметра дросселирующего отверстия на величину расчетного зазора. Одним из сложных элементов, в технологической цепочки, изготовления элементов газостатической опоры является обеспечение необходимого диаметра дросселирующего отверстия по рабочим чертежам опоры. Сложность заключается не только в технологической, но и в

конструкторской подготовке технической документации. На сегодняшний день отсутствуют какие-либо рекомендации по проектированию данного типа опор. Экспериментально и, в какой-то мере теоретически, установлено, что диаметр дросселирующих отверстий составляет десятые доли миллиметра. Инструменты для изготовления отверстий малых диаметров ограничены. Кроме того, на точность изготовления отверстий малого диаметра существенно влияют технологические факторы. Для выявления влияния погрешности диаметра дросселирующего отверстия на величину расчетного зазора проведены теоретические исследования. Переменным параметром в данном случае является параметр d_p и, следовательно, зависящий от него параметр A_p . Поскольку данная зависимость является квадратичной, то формула для вычисления измененного параметра A_{pR} примет вид

$$A_{pR} = A_p \left(\frac{d_{pR}}{d_p} \right)^2, \quad (3.42)$$

где d_{pR} – реальный диаметр отверстия.

С учетом этого формулы (3.40) для определения зазоров примут вид

$$H = \sqrt[3]{\frac{A_{pR} \Pi(P_s, P_k)}{A_h (P_k^2 - 1)}}, h = h_0 H. \quad (3.43)$$

Исследования проведены для газостатической опоры с номинальными геометрическими параметрами $r_0 = 25$ мм и $r_1 = 12,5$ мм. Показано, что на характеристики опоры влияют отклонения размеров диаметра дросселирующих отверстий, которые составляют десятые и тысячные доли миллиметра (рис. 3.11). Расчеты проведены для номинальных расчетных зазоров в опоре $h_0 = 10, 20, 30$ мкм. Диаметр дросселирующих отверстий меняли от номинального значения 0,6 мм в плюс и в минус до 0,04 мм.

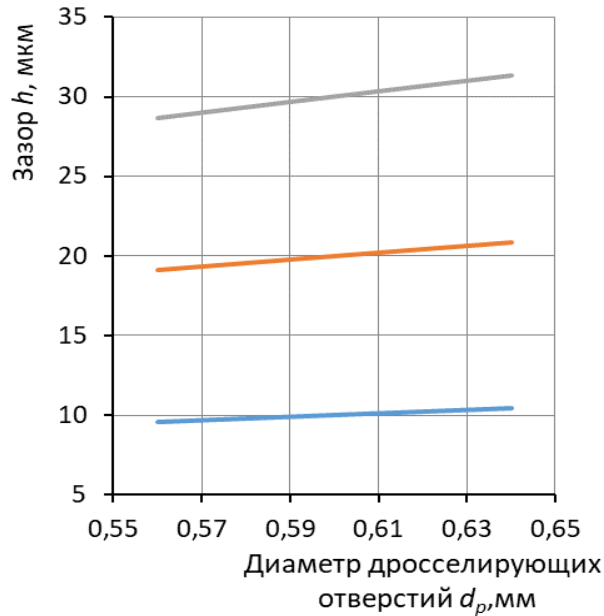


Рисунок 3.11 – Влияние отклонений дросселирующих отверстий d_p (мм) на точность позиционирования подвижной части опоры при различных значениях номинального зазора h_0 (мкм)

Расчеты показывают, что при зазоре в опоре, равным 20 мкм, изменение диаметра дросселирующих отверстий от номинального значения 0,6 мм в пределах 7 квалитета (допуск равен 10 мкм) приведет к изменению зазора в опоре в пределах 2 %. Погрешность дросселирующих отверстий в пределах допуска в 40 мкм, что соответствует 10 квалитету, приведет к изменению зазора в пределах 5 %. Дальнейшее увеличение допуска нецелесообразно, т. к. приведет к изменению номинального размера диаметра дросселирующего отверстия.

По результатам исследования можно заключить:

1. Разработана математическая модель аэроэстатической опоры с двойным дросселированием воздуха в магистрали нагнетания, позволяющая определить изменения основных характеристик опоры в зависимости от отклонений размеров опорных поверхностей и дросселирующих устройств.
2. Исследования показали, что изменение наружного диаметра опоры и диаметра расположения дросселирующих отверстий в пределах 12 - 16 квалитетов повлечет за собой изменение зазора, а, следовательно, и положение подвижной

части опоры, в пределах от 1 до 8 %. При проектировании аэростатических опор нормирование точности наружного диаметра и диаметра расположения дросселирующих отверстий рекомендуется осуществлять по 14 качеству точности.

3. 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 [117].

3.5. 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. Это обусловлено погрешностью монтажа и отклонением от перпендикулярности опорной поверхности относительно осей посадочных поверхностей вставок.

Отклонение от параллельности δ (рис. 3.12) оценивается по наружному диаметру опоры и выражается в линейных единицах (ГОСТ 24643-81[140]).

При исследовании газостатических опор зазор h принято оценивать по оси опоры. Однако при отклонении от параллельности опорных поверхностей зазор по оси опоры измерить практически невозможно. Поэтому его измеряют по величине поднятия подвижной части при подаче воздуха от точки касания оппозитных частей опоры.

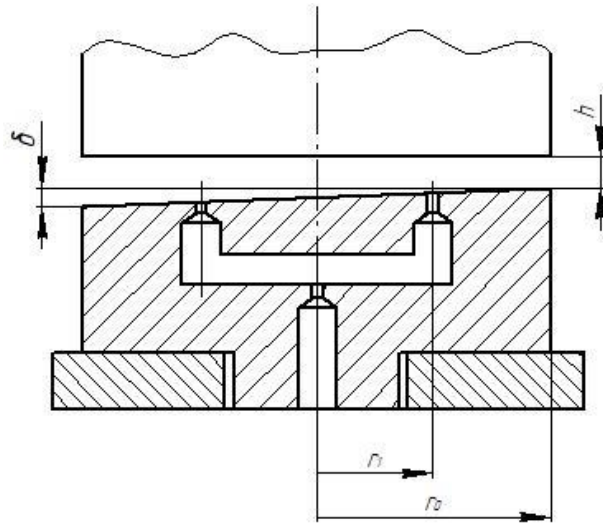


Рисунок 3.12. – Газостатическая опора с двойным дросселированием
с отклонением расположения опорных поверхностей

При математическом моделировании опоры величину зазора представим, как

$$h_s = h + 0,5\delta \left(1 - \frac{r}{r_0} \cos \varphi\right) \quad (3.44)$$

Значения дросселирующих устройств рассчитаны при номинальных параметрах опоры и параллельных опорных поверхностях при номинальном зазоре h .

Варьируемые параметры:

- 1) наружный радиус опоры $r_0 = 25, 50, 75$ мм;
- 2) зазор в опоре $h = 10, 20, 30$ мкм;
- 3) отклонение от параллельности:
 - для $h = 10$ мкм, $\delta = 2, 4, 6$ мкм;
 - для $h = 20$ мкм, $\delta = 4, 6, 10$ мкм;
 - для $h = 30$ мкм, $\delta = 6, 10, 16$ мкм.

Если пренебречь влиянием окружающих перетоков смазки на несущую способность опоры, то в стационарном режиме давление подчиняется краевой задаче для дифференциального уравнения Рейнольдса [99]

$$\begin{cases} \frac{d}{dr} \left(rh_s^3 \frac{dp^2}{dr} \right) = 0, \\ p(r_1) = p_k, p(r_0) = p_a, \end{cases} \quad (3.45)$$

где $p_k(\varphi)$, p_a – переменное давление на выходе газа из дросселей и давление окружающей среды.

После двойного интегрирования уравнения задачи (3.45) получим

$$p^2(r) = C_1 J(a, r) + C_2, \quad (3.46)$$

где

$$J(a, r, \varphi) = \int_a^r \frac{dr}{rh_s^3(r, \varphi)}. \quad (3.47)$$

В междроссельной области

$$p^2(r) = C_1 J(0, r, \varphi) + C_2. \quad (3.48)$$

Из (3.47) следует, что $J(0,0) = \infty$. Поскольку давление в несущем слое конечно, то это может иметь место только при $C_1 = 0$. Подставив первое граничное условие (3.45) в (3.48), найдем

$$p(r, \varphi) = p_k. \quad (3.49)$$

Функция (3.49) указывает на то, что в междроссельной области давление зависит только от окружной координаты и равно переменному давлению на выходе из демпфирующих дросселей.

В наружной кольцевой области неизвестные константы, входящие в (3.48), можно найти, решив систему линейных уравнений

$$\begin{cases} C_1 J(r_1, r_1, \varphi) + C_2 = p_k^2, \\ C_1 J(r_1, r_0, \varphi) + C_2 = p_a^2. \end{cases} \quad (3.50)$$

Очевидно, $J(r_1, r_1, \varphi) = 0$. Следовательно, $C_2 = p_k^2$. Далее, из второго уравнения (3.50) найдем $C_1 = \frac{p_a^2 - p_k^2}{J(r_1, r_0, \varphi)}$. С учетом этого получим формулу для функции распределения давления в кольцевом зазоре

$$p(r, \varphi) = \sqrt{(p_a^2 - p_k^2) \frac{J(r_1, r, \varphi)}{J(r_1, r_0, \varphi)} + p_k^2} \quad (3.51)$$

Несущая способность опоры определяется формулой

$$w = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} r(p - p_a) dr d\varphi \quad (3.52)$$

Формулу (3.52) можно упростить, приняв во внимание (3.49), (3.31)

$$w = r_1^2 \left(\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} p_k d\varphi - \pi p_a \right) + \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_0} r \left(\sqrt{(p_a^2 - p_k^2) \frac{J(r_1, r, \varphi)}{J(r_1, r_0, \varphi)} + p_k^2} - p_a \right) dr d\varphi \quad (3.53)$$

Двойной интеграл формулы (3.53) вычисляли при помощи численной кубатурной формулы Симпсона [137].

Переменное давление $p_k(\varphi)$ на выходе газа из кольцевых диафрагм на линии наддува определим решением системы нелинейных уравнений, определяющих баланс массовых расходов смазки через дросселирующие и демпфирующие дроссели

$$\begin{cases} h^3(p_k^2 - p_a^2) = A_k h \Pi(p_p, p_k), \\ h^3(p_k^2 - p_a^2) = A_p \Pi(p_s, p_p), \end{cases} \quad (3.54)$$

где A_k, A_p – размерные комплексы параметров дросселей.

Комплексы A_k, A_p найдем из условий настройки сопротивлений дросселей при отсутствии перекоса поверхностей подпятника. В этом случае давления p_k, p_p будут постоянными. Зададим их, используя коэффициенты настройки χ, ζ сопротивления дросселей по формулам

$$p_k = \sqrt{p_a^2 + \chi(p_s^2 - 1) + p_a^2}, \quad (3.55)$$

$$p_p = \sqrt{p_k^2 + \zeta(p_s^2 - p_k^2)}. \quad (3.56)$$

Из (3.54) теперь можно найти комплексы

$$A_k = \frac{h^2(p_k^2 - p_a^2)}{\Pi(p_p, p_k)}, \quad (3.57)$$

$$A_p = \frac{h^3(p_k^2 - p_a^2)}{\Pi(p_s, p_p)}. \quad (3.58)$$

При наличии отклонения от параллельности δ переменное давление p_k на выходе газа их кольцевых диафрагм можно найти из второго уравнения системы (3.54)

$$p_k(\varphi) = \sqrt{p_a^2 + \frac{A_p \Pi(p_s, p_p)}{h_s^3}}. \quad (3.59)$$

На рис. 3.13 показаны зависимости $p_k(\varphi)$ (МПа) для разных значений $\delta = 0, 2, 4, 6$ мкм при фиксированных $r_0 = 25$ мм, $h = 20$ мкм, $p_s = 0.5$ МПа, $\chi = 0.5$, $\zeta = 0.2$.

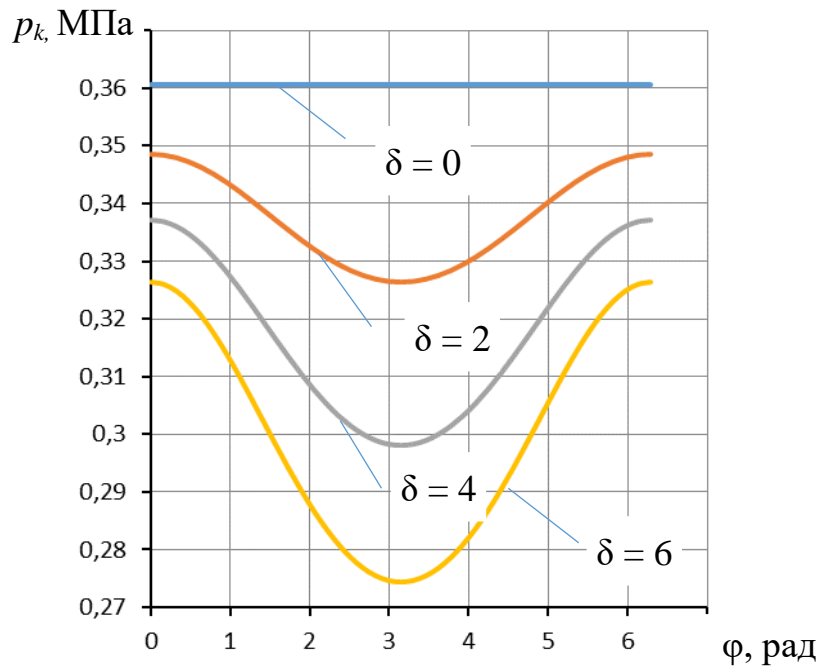


Рисунок 3.13. – Распределение давления газа p_k (МПа) по диаметру расположения дросселирующих отверстий для разных значений δ (мкм)

Видно, что отклонение от параллельности оказывает значительное влияние на функцию давления на линии наддува. При отсутствии перекоса ($\delta = 0$) функция постоянна. С увеличением δ она становится чётной унимодальной функцией с наименьшим значением в точке симметрии $\varphi = \pi$ (точка наибольшего перекоса на линии наддува). При этом, чем больше δ , тем меньше значения функции. Можно предположить, что обнаруженный эффект может негативно сказаться на несущей способности опоры с перекосом несущих поверхностей.

Графические зависимости несущей способности w (кН) от отклонения от параллельности δ (мкм) для разных значений наружного радиуса r_0 при ведены на рис. 3.14 – 3.16 для $r_0 = 25$ мм, 50 мм и 75 мм.

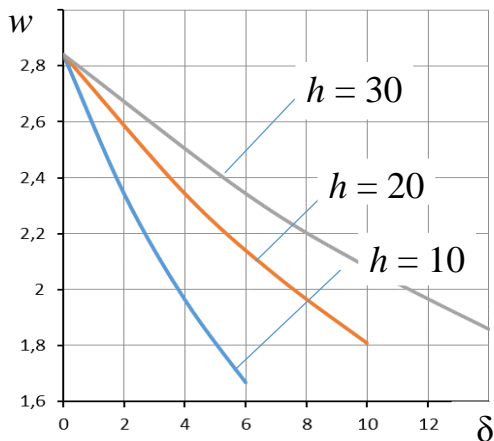


Рисунок 3.14. – Зависимости несущей способности w (кН) от величины перекоса δ (мкм) при наружном радиусе $r_0 = 25$ мм

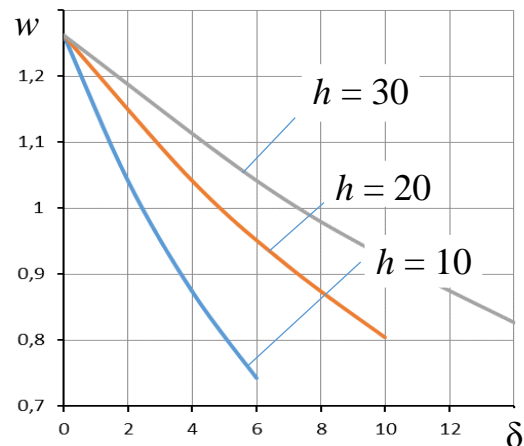


Рисунок 3.15. – Зависимости несущей способности w (кН) от величины перекоса δ (мкм) при наружном радиусе $r_0 = 50$ мм

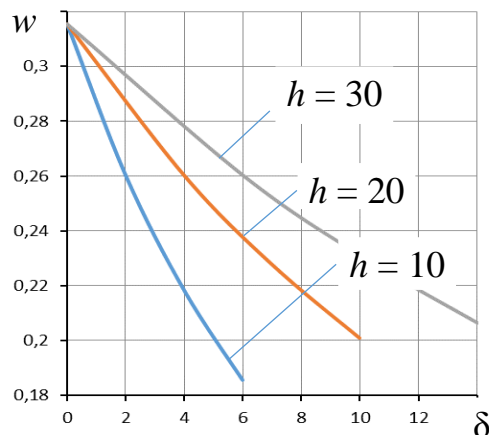


Рисунок 3.16. – Зависимости несущей способности w (кН) от величины перекоса δ (мкм) при наружном радиусе $r_0 = 75$ мм

Неравномерность распределения давления газа по диаметру расположения дросселирующих отверстий (рис. 3.13) вызывает снижение несущей способности, вызванной отклонением от параллельности опорных поверхностей. Анализ результатов расчетов показал, 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 в исследуемом диапазоне (см. рис 3.14 – 3.16).

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 [140].

3.6. Влияние погрешностей формы опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры

Отклонения от правильной геометрической формы поверхностей делятся на отклонение формы, волнистость поверхности и шероховатость поверхности. Условное деление (отнесение к той или иной группе) осуществляют по отношению длины волны S погрешности к ее высоте Δ . Если погрешность длинноволновая, т.е. $S/\Delta > 1000$, то такую погрешность относят к отклонению формы. Допуски формы установлены ГОСТ 24643-81 [140]. Если отношение длины волны к ее высоте $S/\Delta < 50$, то погрешность относят к шероховатости. Параметры шероховатости и их значения нормированы ГОСТ 2789–73 [141]. Если $S/\Delta = 50–1000$, то погрешность

относят к волнистости. Данная погрешность проявляется редко, национального стандарта для нормирования волнистости нет. Однако волнистость может нормироваться в отраслевых нормативных документах, например, допустимая величина волнистости устанавливается для беговых дорожек подшипников качения.

При математическом моделировании опоры с погрешностями опорных поверхностей зависимость толщины смазочного слоя от величины текущего радиуса определяли по формуле

$$h_s(r) = h + \frac{\Delta}{2} \cos\left(\frac{\pi nr}{r_0}\right) \quad (3.60)$$

где Δ – высота погрешности;

n – количество волн погрешности в пределах наружного радиуса r_0 .

Согласно выражению (3.60) длина волны

$$S = \frac{r_0}{n} \quad (3.61)$$

Элементы математической модели газостатической опоры приведены в подразделе 3.2. Параметры дросселя рассчитывались для опоры с гладкими поверхностями, т.к. на стадии проектирования опоры учесть погрешности опорных поверхностей не представляется возможным. Методика определения параметров дросселей приведена в подразделе 3.3.

Расчеты проведены в широком диапазоне погрешностей, охватывающие как отклонения формы поверхностей, так и шероховатость. Результаты расчета газостатической опоры приведены на рис. 3.17.

Из графика видно, что несущая способность может как снижаться, так и возрастать в сравнении с опорой с идеальными поверхностями. На величину несущей способности влияет много факторов. Рассмотрим их отдельно.

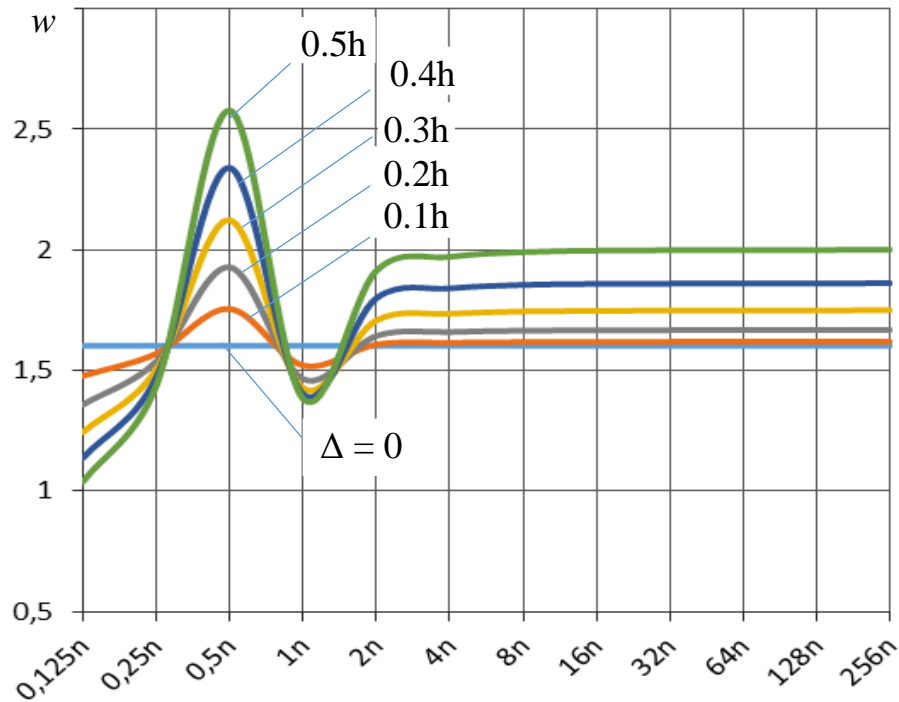


Рисунок 3.17. – Зависимость несущей способности w (Н) от количества волн неровностей n

3.6.1. Влияние отклонений формы опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры

Подробнее рассмотрим газостатическую опору с наружным радиусом 25 мм и с отношением радиусов $r_0/r_1 = 0,5$. Отклонение формы будем выражать косинусоидой с числом волн 0,5; 1,0; 2,0 на радиусе r_0 . Результаты расчета приведены на табл. 3.1.

Из графиков видно, что на площади опоры, ограниченной радиусом расположения дросселирующих отверстий r_1 давление не значительно зависит от формы изменения погрешности, однако с ростом величины погрешности давление в стационарной зоне увеличивается. Это объясняется тем, что расчет параметров дросселей происходит для идеальной толщины несущего слоя величиной h , а реальная толщина зависит от формы и величины погрешности. Это рассуждение можно распространить и на несущую способность. Классическое выражение несущей способности заключается в произведении давления на

эффективную площадь опоры. Толщина несущего слоя на прямую в эту зависимость не входит, однако она влияет на расход газа через опору и определяет параметры дросселей. Таким образом, первая часть несущей способности определяется площадью и давлением в стационарной зоне.

Вторая часть несущей способности в большей части определяется функцией распределения давления по ширине так называемой опорной перемычки от r_1 до r_0 . В свою очередь функция распределения давления зависит как от формы погрешности, так и от ее величины.

Теоретически изменить форму несущего слоя можно не только изменением числа волн погрешности как показано в таблице 3.1, но и сдвигом по фазе косинусоиды относительно начала координат при одинаковом количестве волн. Так в табл. 3.2 показаны результаты исследования газостатической опоры при сдвиге по фазе, равной 0, 90 и 180 градусов. Расчеты подтверждают влияние формы толщины несущего слоя по ширине опорной перемычки как на функцию распределения давления, так и на несущую способность.

Анализ результатов расчетов, представленных в таблицах 3.1 и 3.2 позволяют сделать важный вывод о том, что погрешность формы несущих поверхностей газостатической опоры может приводить не только к снижению несущей способности, но и к ее увеличению, т.е. величиной и формой погрешности можно управлять несущей способностью.

При классическом проектировании газостатических опор следует учитывать, что отклонения формы несущих поверхностей, соответствующие 20 % от номинального значения толщины несущего слоя могут приводить к измерению несущей способности до 20 % от расчетного значения как в сторону снижения, так и в сторону увеличения.

Допуск формы опорных поверхностей рекомендуется устанавливать в соответствие с 3 – 5 степенью точности.

Таблица 3.1. – Изменение несущей способности, вызванной отклонениями формы опорных поверхностей, при различном количестве волн отклонений

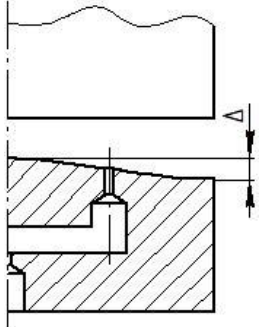
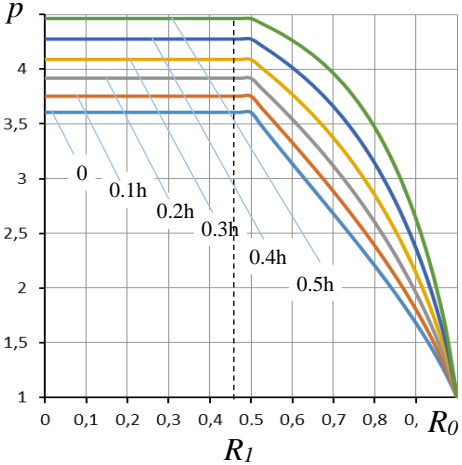
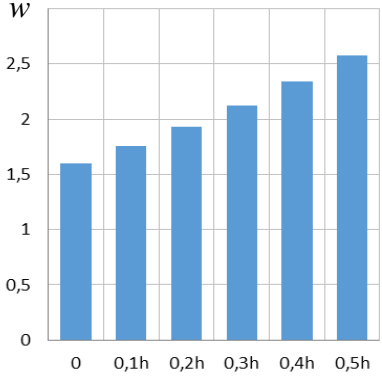
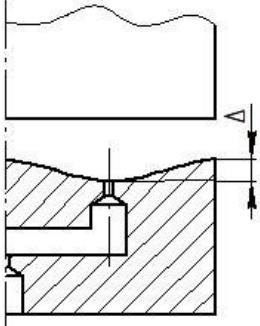
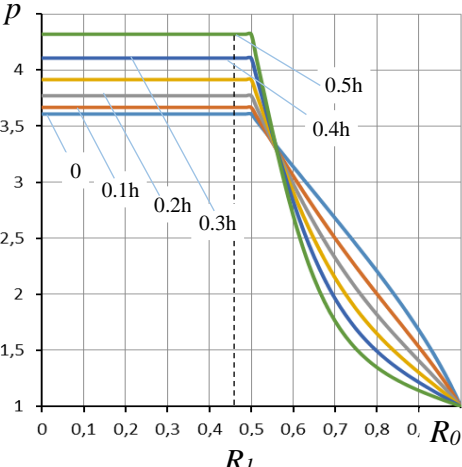
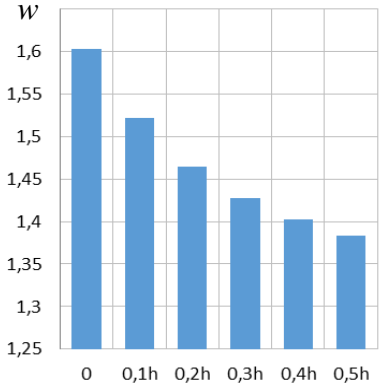
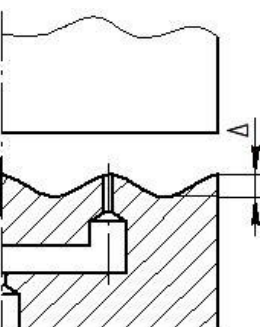
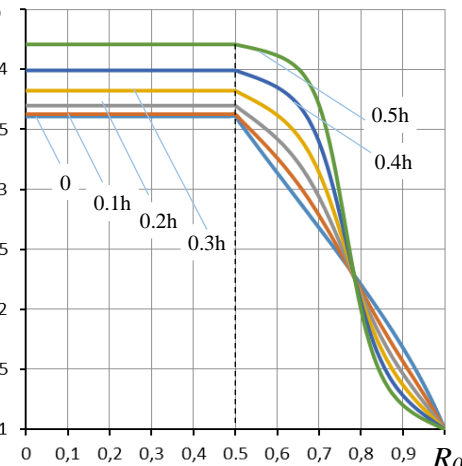
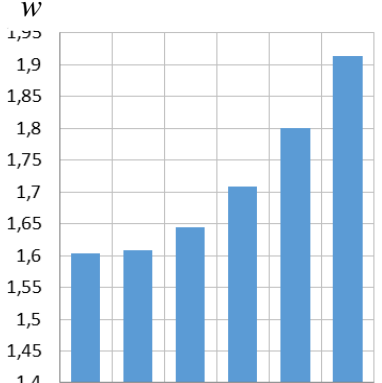
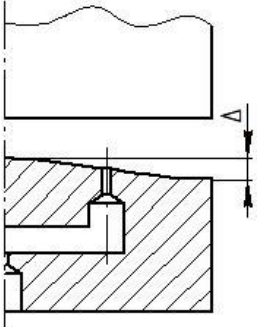
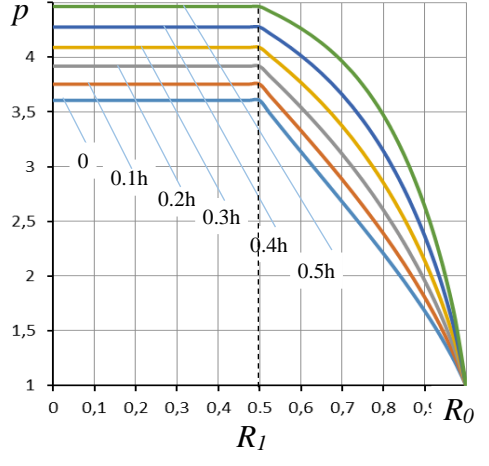
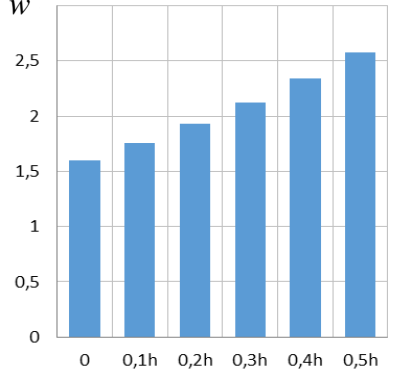
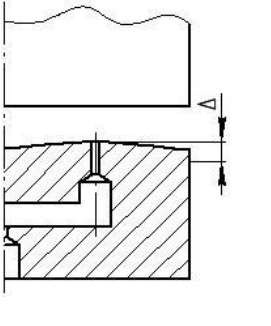
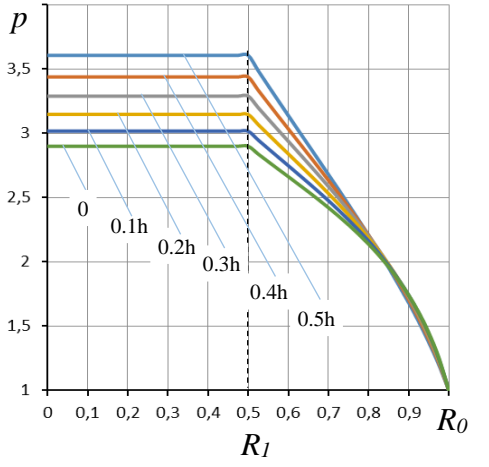
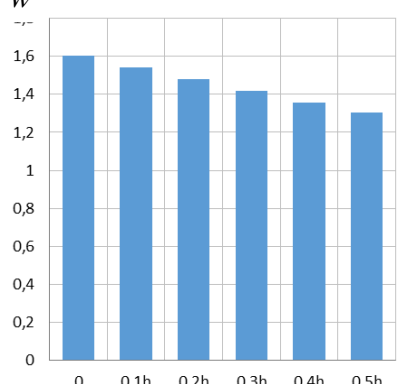
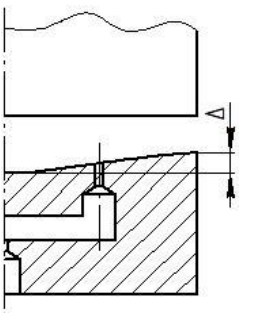
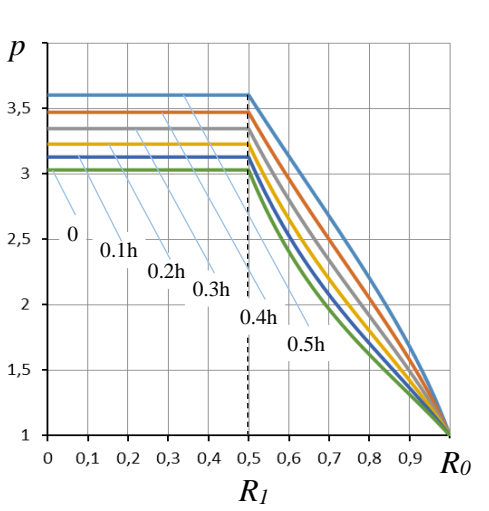
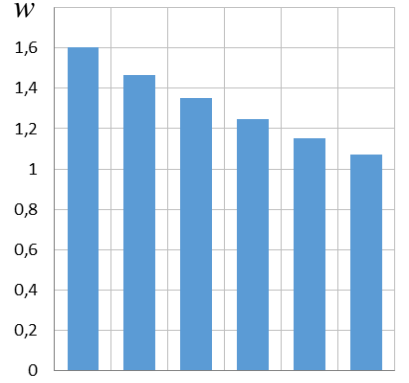
№	Число волн и форма слоя	Эпюра распределения давления	Несущая способность
a)	$n = 0,5$ 		
б)	$n = 1,0$ 		
в)	$n = 2,0$ 		

Таблица 3.2. – Изменение несущей способности, вызванной отклонениями формы опорных поверхностей, при различном сдвиге косинусоиды

№	Сдвиг косинусоиды по фазе и форма слоя	Эпюра распределения давления	Несущая способность
а)	$\Psi = 0$ град. 		
б)	$\Psi = 90$ град. 		
в)	$\Psi = 180$ град. 		

Влияние отношения радиуса расположения дросселирующих отверстий к наружному радиусу опоры представлено на рис. 3.18.

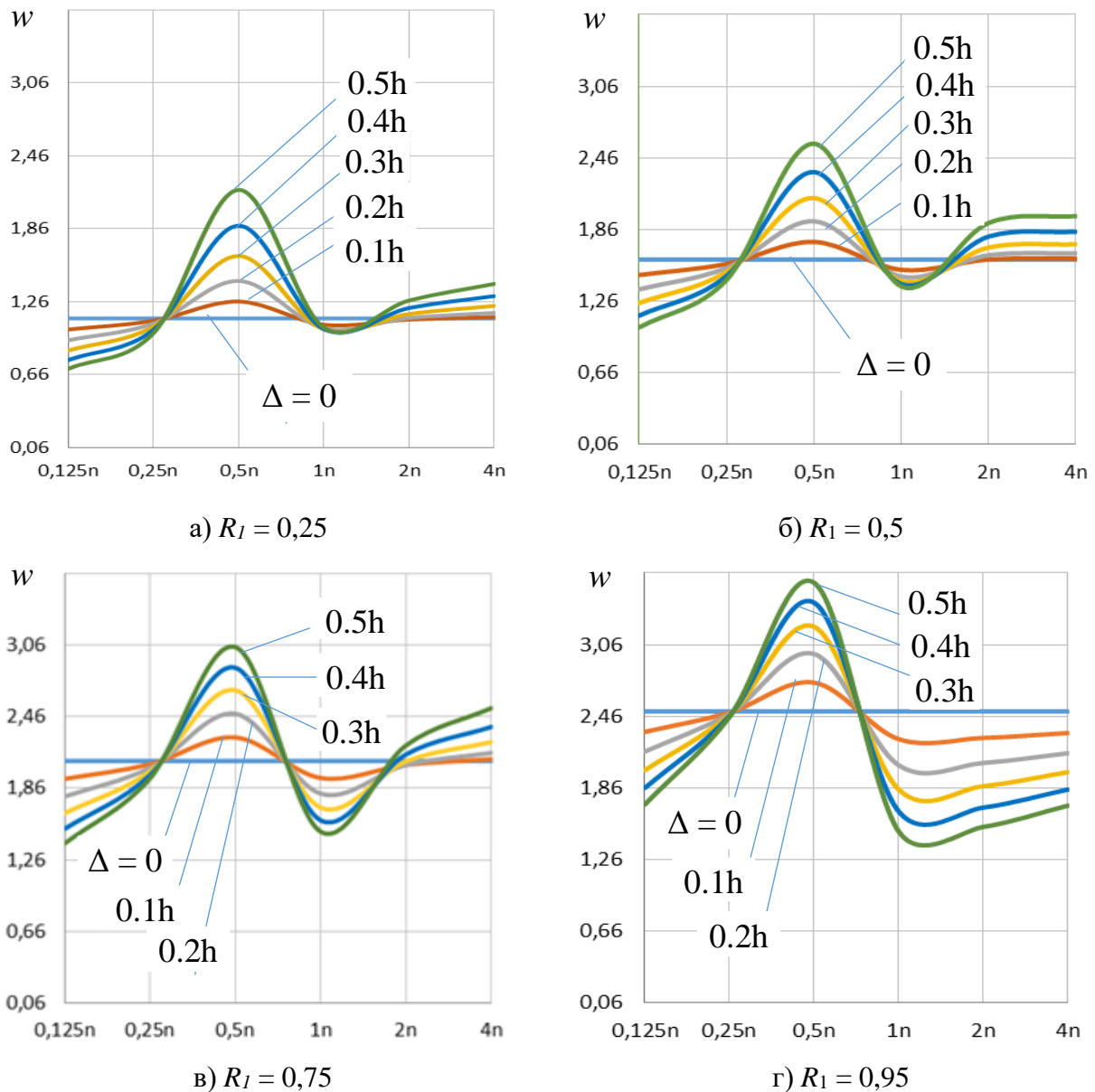


Рисунок 3.18. – Зависимость несущей способности w (Н) от количества волн неровностей n при различных радиусах расположения питательных отверстий r_1

С увеличением отношения радиусов $R_1 = r_1 / r_0$ (уменьшением ширины опорной перемычки) увеличивается несущая способность для опоры с опорными поверхностями идеальной формы. Процентное соотношение влияния погрешностей формы на несущую способность опоры примерно одинаково для

всех соотношений радиусов. Поэтому выше приведенные рекомендации можно распространить на все опоры в исследуемом диапазоне соотношений радиусов.

3.6.2. Влияние шероховатости опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры

При оценке влияния шероховатости на несущую способность газостатической опоры принимаем параметр R_{max} , величина которого определяется разностью между линией выступов и линией впадин. При математическом моделировании реальный профиль шероховатости заменяем теоретическим (см. рис. 3.19).

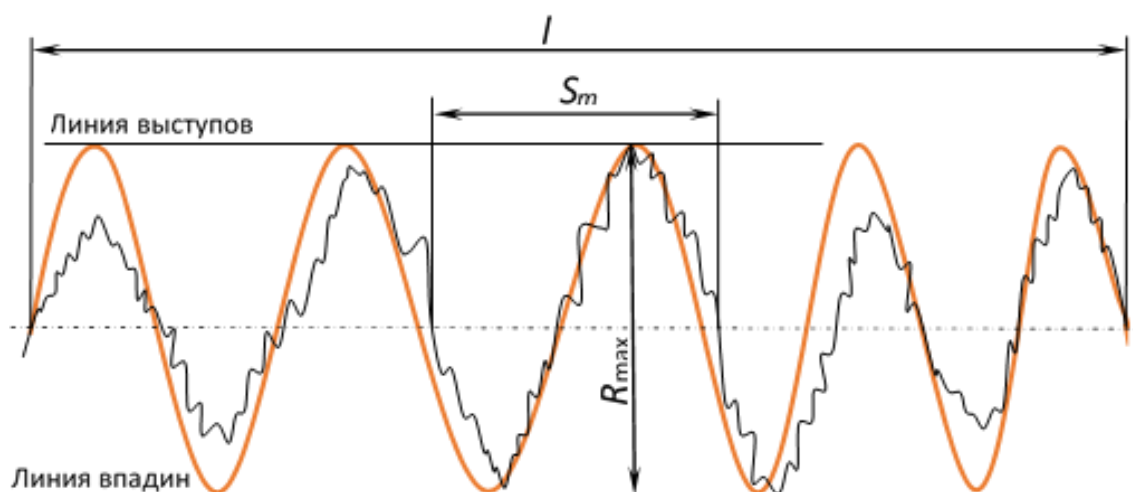


Рисунок 3.19. – Параметры шероховатости опорной поверхности газостатической опоры

Расчеты проведены для соотношений длины волны к высоте, которые охватывают как шероховатость поверхности, так и волнистость.

Плоское чистовое и тонкое шлифование опорных поверхностей обеспечивает шероховатость по критерию R_a в пределах от 0,2 до 1,6 мкм. Для такой шероховатости параметр R_{max} , принятый при исследовании будет соответствовать 1 – 7 мкм. Для газостатической опоры с толщиной несущего слоя в 10 мкм $R_{max} = 1$ мкм будет соответствовать 10 % от толщины несущего слоя, а

$R_{\max} = 7$ мкм – 70 %, что в принципе недопустимо. Из графиков (рис. 3.20) видно, что шероховатость в пределах 20 % от толщины несущего слоя изменяет несущую способность на 5 %.

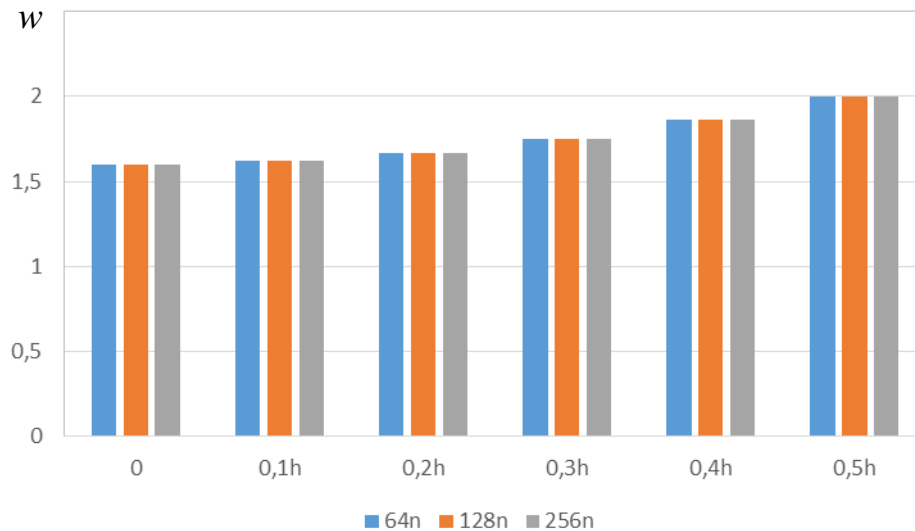


Рисунок 3.20. – Зависимость несущей способности w (Н) от количества волн неровностей n

Исходя из выше проведенного анализа можно рекомендовать при проектировании опор назначать шероховатость поверхности по критерию R_a 0,32 мкм и меньше.

3.7 Разработка методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор

На основе полученных данных была разработана методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор, которая повысит качество конструкторской документации на элементы опор, и позволит обоснованно нормировать точность геометрических параметров элементов опор на стадии их проектирования. Методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор приведена в Приложении 1.

Данная методика используются в учебном процессе СФУ при изучении контрольно-измерительного и испытательного оборудования (Приложение 3).

3.8. Выводы по третьей главе

1. Показано, что для повышения точности позиционирования, плавности перемещения, долговечности работы в направляющих прецизионных средств контроля (например, КИМ) используют газостатические опоры. Предложено для практического применения и дальнейшего исследования принять газостатическую опору с двойным дросселированием, которая обладает рядом преимуществ в сравнении с опорами, используемыми в направляющих КИМ.

2. Уточнена математическая модель газостатической опоры с двойным дросселированием, позволяющая исследовать влияние отклонений геометрических параметров на характеристики опоры. Она представляет систему уравнений, характеризующих баланс расходов газа через дросселирующие устройства и тонкий слой опоры, а также баланс сил, действующих на подвижную часть опоры. Для решения конкретной задачи в математическую модель представляется выражение, описывающее форму несущего слоя. Исходя из этого выбирается конкретный метод решения задачи.

3. Получены аналитические зависимости для расчета параметров дросселирующих устройств, которые позволяют выбрать оптимальные параметры газостатической опоры. Приведены зависимости внешней нагрузки от диаметра дросселирующего сопла при различных значениях давления нагнетания. Данные зависимости позволяют выбрать параметры опоры по их номинальным значениям, необходимые при проектировании опоры и при проведении дальнейших исследований.

4. Проведено исследование влияния отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные

характеристики. Даны рекомендации по нормированию точности наружного радиуса газостатической опоры, радиуса расположения дросселей и диаметров самих дросселирующих отверстий. Установлено, что наиболее чувствительны характеристики опоры к изменению размеров самих дросселирующих отверстий, точность которых при изготовлении должна соответствовать 8 – 10 квалитетам.

5. Исследования влияния отклонения расположения опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры показало, что отклонение от параллельности опорных поверхностей оказывает значительное влияние на функцию давления на линии наддува и, следовательно, на несущую способность. Анализ результатов расчетов показал, 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 в исследуемом диапазоне.

6. Проведено исследование влияния погрешностей формы опорных поверхностей на несущую способность газостатической опоры. Анализ результатов расчетов позволяет сделать важный вывод о том, что погрешность формы несущих поверхностей газостатической опоры может приводить не только к снижению несущей способности, но и к ее увеличению, т.е. величиной и формой погрешности можно управлять несущей способностью. Даны рекомендации по нормированию допусков формы и шероховатости несущих поверхностей газостатической опоры.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1. Особенности конструкций гидростатических опор в испытательном оборудовании

Гидростатические опоры широко применяются в прецизионном и тяжело нагруженном оборудовании. В последнее время гидростатические подшипники находят применение в испытательном оборудовании. Так компания Dongling Technologies (КНР) [142] выпускает электродинамические одноосевые вибростенды со столами скольжения на гидростатических опорах различной модификации (рис. 4.1):

– столы скольжения серии GT с V-образными опорами (рис. 4.1, а) состоят из пластины скольжения и V-образных опор. V-образные опоры обладают сверхвысокой устойчивостью против опрокидывающего момента;

– столы скольжения серии ВТ с гидростатическим опорами (рис. 4.1, б). Они используются для испытания образцов при очень больших нагрузках с высоким смещением центра тяжести. Чем больше количество гидростатических опор, тем выше сопротивление опрокидывающему моменту;

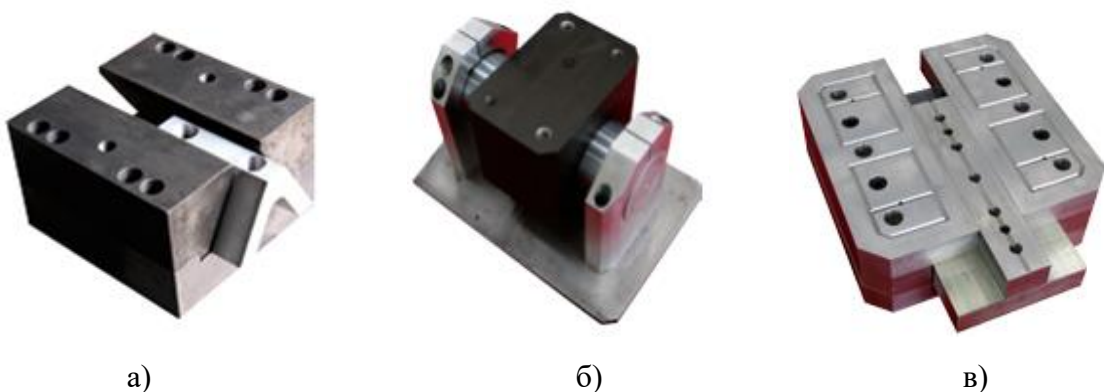


Рисунок 4.1. – Гидростатические опоры компании Dongling Technologies [142]:

а – серия GT; б – серия ВТ; в – серия ТВТ

– столы скольжения серии ТВТ с Т-образными опорами (рис. 4.1, в) состоят из горизонтального стола и направляющих на основе Т-образных опор низкого давления. Такие направляющие имеют высокие динамические характеристики и обеспечивают простоту сборки в сравнение с другими типами направляющих.

В большинстве случаев такие гидростатические опоры используют по 4 или 6 штук на один испытательный стенд (см. раздел 1, рис. 1.3).

Фирма ECON [143, 144] выпускает вибрационные испытательные стенды, поставка столов скольжения которых возможна с дополнительными гидростатическими подшипниками (рис. 4.2).

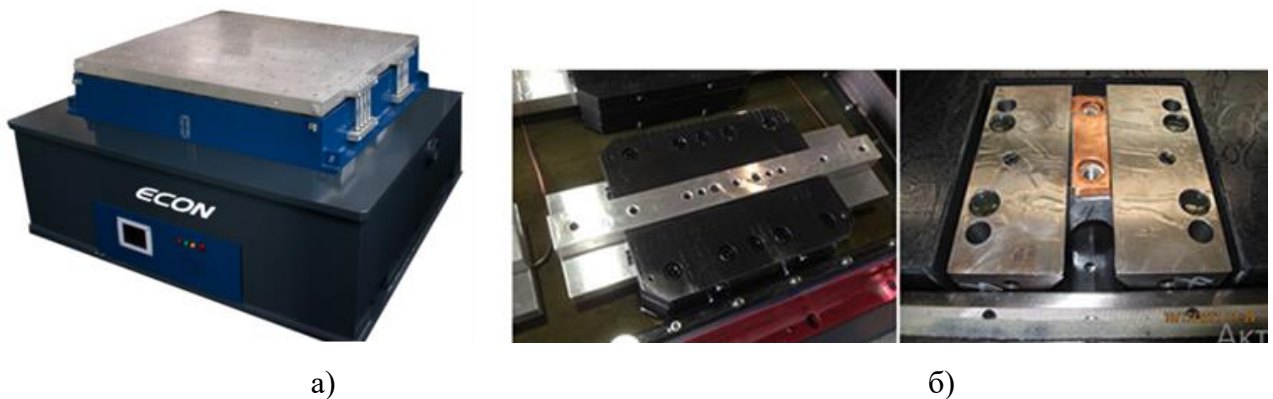


Рисунок 4.2. – Вибрационные испытательные стенды фирмы ECON [143]:

а – стол скольжения фирмы ECON; б – гидростатическая опора

Более подробно конструкции гидростатических опор приведены в разделе 1. Проведенный анализ показал, что в прецизионном оборудовании используется большое многообразие конструкций гидростатических опор. Это объясняется широким диапазоном условий работы, различными технологическими возможностями изготовителей и патентными соображениями.

Показано, что для гидростатических направляющих испытательного оборудования используют вкладыши, представляющие незамкнутые гидростатические опоры с пассивной компенсацией расхода смазки (с дросселями постоянного сопротивления) с центральной рабочей камерой (рис. 4.3) круглой или прямоугольной формы. В одном оборудовании устанавливают восемь и более

вкладышей, которые для обеспечения равновесного состояния должны обладать одинаковыми техническими и эксплуатационными характеристиками. Эти характеристики гидростатических опор должны нормироваться при проектировании и обеспечиваться при изготовлении.

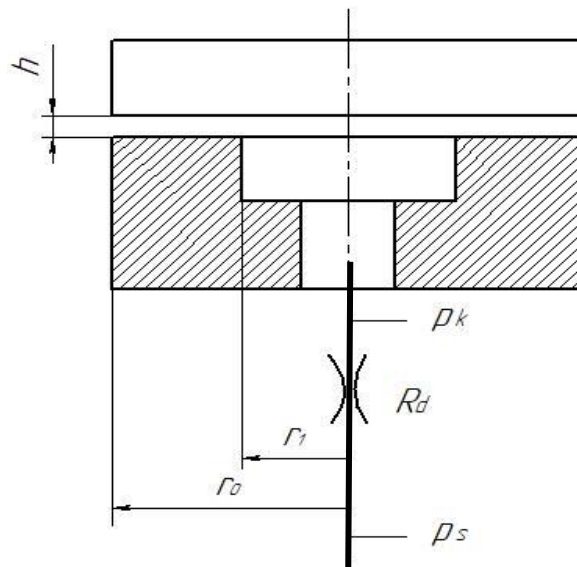


Рисунок 4.3. – Незамкнутая гидростатическая опора

Незамкнутые гидростатические опоры с центральной рабочей камерой круглой формы приняты в качестве объекта дальнейших исследований.

Известные инженерные методики направлены на расчет характеристик опор по их номинальным параметрам и не учитывают геометрические отклонения опорных поверхностей. В данном разделе проведены исследования, в результате которых установлена связь геометрических отклонений с отклонением характеристик опоры, рассчитанным по их номинальным значениям.

4.2. Математическая модель незамкнутой гидростатической опоры с центральной рабочей камерой

Основу классической математической модели незамкнутой гидростатической опоры с центральной рабочей камерой составляет система

дифференциальных уравнений, характеризующих баланс расхода смазки через несущий слой рабочей камеры опоры и соответствующий компенсатор расхода смазки (дрессель постоянного сопротивления), а также баланс сил, действующих на подвижную часть опоры.

При постоянной нагрузке в несущем слое в области рабочей камеры давление p постоянно и равно давлению p_k . На кольце $r \in [r_1, r_0]$ функция $p(r)$ распределения давления подчиняется дифференциальному уравнению Рейнольдса [145]

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dp}{dr} \right) = 0, \quad (4.1)$$

с граничными условиями

$$p_s(r_1) = p_k, p(r_0) = 0. \quad (4.2)$$

Общее решение задачи (4.1), (4.2) имеет вид

$$p(r) = C_1 \ln r + C_2. \quad (4.3)$$

Подставив граничные условия (4.2) в (4.3), получим систему линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов C_1, C_2

$$\begin{cases} C_1 \ln r_1 + C_2 = p_k, \\ C_1 \ln r_0 + C_2 = 0. \end{cases} \quad (4.4)$$

Решив (4.4) и подставив решение в (4.3), после несложных преобразований найдем функцию давления

$$p(r) = p_k \frac{\ln(r / r_0)}{\ln(r_1 / r_0)}. \quad (4.5)$$

Решение (4.5) допускает аналитические квадратуры для несущей способности и объемного расхода смазки

$$w = 2\pi \int_0^{r_0} r p dr = \frac{\pi(r_0^2 - r_1^2) p_k}{2 \ln(r_0 / r_1)}, \quad q_h = \frac{\pi h^3 p_k}{6\mu \ln(r_0 / r_1)}. \quad (4.6)$$

В этих выражениях:

h – толщина несущего слоя смазки;

r_0 – наружный радиус опоры;

r_1 – внутренний радиус опоры;

μ – динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости;

p_k – давление в рабочей камере опоры;

p_s – номинальное давление смазки в магистрали нагнетания.

Расход через дроссель постоянного сопротивления зависит от сопротивления дросселя R_d и перепада давления на нем

$$q_d = R_d (p_s - p_k), \quad (4.7)$$

Для дросселя в виде капилляра его сопротивление определяется формулой [145]:

$$R_d = \frac{\pi d^4}{128\mu l}, \quad (4.8)$$

где d, l – диаметр и длина капилляра.

Параметр R_d найдем из условия равенства расходов

$$\frac{\pi h^3 p_k}{6\mu \ln(r_0 / r_1)} = R_d (p_s - p_k) \Rightarrow R_d = \frac{\pi h^3 p_k}{6\mu \ln(r_0 / r_1) (p_s - p_k)}. \quad (4.9)$$

Для большей общности результатов часть исследований проведена в безразмерной форме, для этого в математической модели размерные величины (как правило, обозначены строчными буквами) заменяли безразмерными (как

правило, обозначены аналогичными прописными буквами) следующим образом: $P_i = p_i / p_s$ – безразмерный параметр давления; $H_i = h_i / h_0$ – безразмерный параметр толщины несущего слоя; $R_i = r_i / r_0$ – безразмерный параметр радиальных размеров; $W = w / (\pi \cdot r_0^2 \cdot p_s)$ – безразмерный параметр несущей способности; $Q = q \cdot \mu / (\pi \cdot h_0^3 \cdot p_s)$ – безразмерный параметр расхода смазки.

В данной математической модели значения всех параметров гидростатической опоры представлены по их номинальным значениям. При отклонении любого геометрического параметра гидростатической опоры изменяются (при постоянном расчетном значении дросселя постоянного сопротивления) характеристики опоры. К ним можно отнести изменение расхода смазки через опору, который повлечет за собой либо изменение толщины несущего слоя смазки (нарушение расчетного значения позиционирования подвижной части опоры) при постоянной внешней нагрузке, либо при соблюдении расчетного значения толщины несущего слоя измерение нагрузочной способности опоры. Выявление взаимосвязи между геометрическими отклонениями опоры и ее эксплуатационными характеристиками является актуальной задачей при проектировании и изготовлении направляющих с гидростатическими опорами.

4.3. Влияние отклонений размеров гидростатических опор на их эксплуатационные характеристики

Расчет эксплуатационных характеристик гидростатических опор проводится по их номинальным параметрам, к которым относятся как геометрические параметры (размеры опоры, размеры дросселирующего устройства, зазор в опоре), так другие функциональные параметры (давление нагнетания, давление в рабочей камере, вязкость рабочей жидкости). Методики расчета расходных и нагрузочных характеристик для различных типов и конструкций

гидростатических опор достаточно подробно разработаны, апробированы и успешно используются на практике. Известны результаты исследования по влиянию вязкости рабочей жидкости, температуры ее нагрева и др. на характеристики опор [146]. Даны рекомендации по нормированию пульсации давления нагнетания в системе питания гидростатических опор в зависимости от точностных характеристик опоры [147]. Исследований по влиянию отклонений размеров опор на их эксплуатационные характеристики не выявлено.

При разработке конструкторской документации элементов гидростатической опоры на рабочих чертежах деталей в обязательном порядке указываются номинальные размеры с предельными отклонениями. Отсутствие рекомендаций по назначению предельных отклонений размеров и допусков может привести к ужесточению требований по точности изготовления, что повлечет увеличение неоправданных затрат на изготовление. Снижение требований к точности изготовления приведет к несоответствию требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам опоры.

Ниже проведены исследования, позволяющие нормировать точность размеров элементов гидростатических опор. Для исследования принята незамкнутая гидростатическая опора (см. рис. 4.3), которая может использоваться в качестве самостоятельной опоры или как один из элементов направляющих в прецизионных средствах измерения, испытательном оборудовании и др. Данная опора является частным случаем опор с кольцевой рабочей камерой.

К конструктивным геометрическим параметрам опоры относятся наружный радиус r_0 , внутренний радиус r_1 , и параметры дросселирующего устройства, которые для конкретной опоры являются постоянными и входят в параметр R_d . Функциональным геометрическим параметром опоры является зазор h , который обеспечивает точность позиционирования подвижной части опоры. Отклонения наружного радиуса r_0 и внутреннего радиуса r_1 в процессе изготовления поры неизбежно приведет к отклонению зазора h . Для установления количественной

связи функционального геометрического параметра от конструктивных и проведены данные исследования.

Влияние погрешности изготовления внешнего радиуса r_0 на характеристики опоры.

При постоянной нагрузке, равной несущей способности, уравнение для несущей способности примет вид

$$\frac{\pi(r_0^2 - r_1^2)p_k}{2\ln(r_0/r_1)} = \frac{\pi(r_{R0}^2 - r_1^2)p_{Rk}}{2\ln(r_{R0}/r_1)}, \quad (4.10)$$

где r_{R0} – реальный внешний радиус, полученный в результате изготовления, p_{Rk} – соответствующее ему изменённое давление в кармане

$$p_{Rk} = \frac{(r_0^2 - r_1^2)\ln(r_{R0}/r_1)}{(r_{R0}^2 - r_1^2)\ln(r_0/r_1)} p_k. \quad (4.11)$$

Изменение этого давления повлечет изменение расхода смазки и толщины несущего слоя при стационарной нагрузке на опору.

Баланс реальных расходов определяется уравнением

$$\frac{\pi h_R^3 p_{Rk}}{6\mu \ln(r_{R0}/r_1)} = R_d (p_s - p_{Rk}),$$

откуда следует, что

$$h_R = \sqrt[3]{\frac{6\mu \ln(r_{R0}/r_1) R_d (p_s - p_{Rk})}{\pi p_{Rk}}}. \quad (4.12)$$

При этом изменившийся расход можно найти по формуле

$$q_{Rh} = \frac{\pi h_R^3 p_{Rk}}{6\mu \ln(r_{R0}/r_1)}.$$

Расчеты проведены для опоры, номинальный наружный радиус которой равен 25 (рис. 4.4,а), 50 (рис. 4.4,б) и 75 (рис. 4.4,в) мм. При расчете параметров

дросселя R_d давление в рабочей камере принимали как 0,5 от давления нагнетания ($p_k = 0,5 p_s$). Исследования проведены для номинального зазора в опоре 20, 30 и 40 мкм.

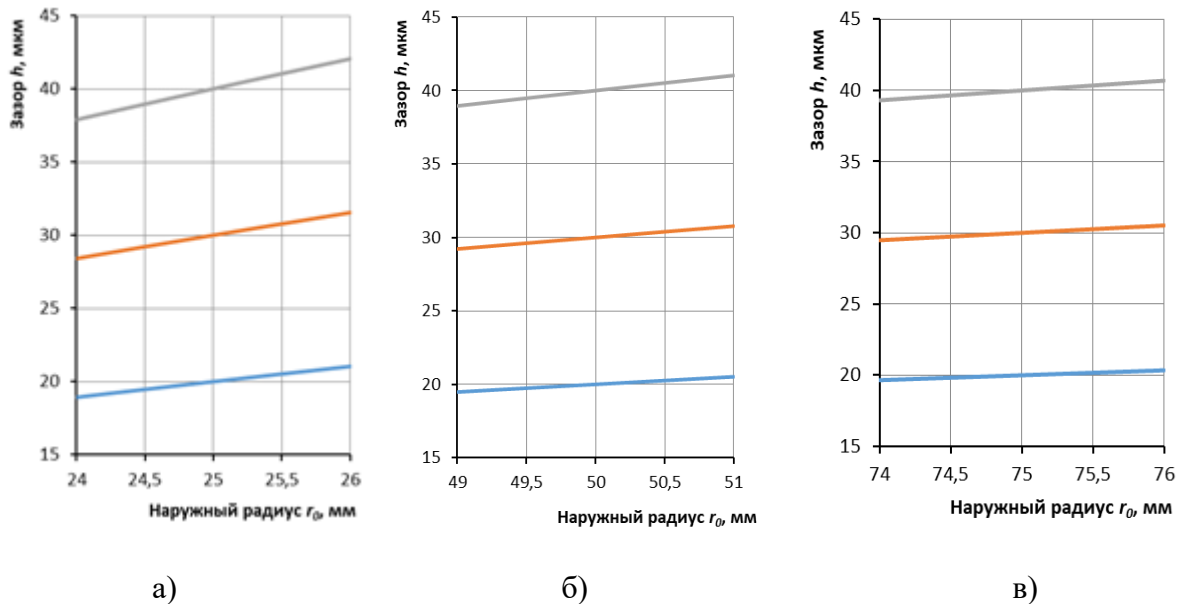


Рисунок 4.4. – Влияние отклонения наружного радиуса опоры r_0 (мм) на измерения зазора h (мкм) при различных значениях номинального зазора h_0 (мкм)

Результаты исследования показали, что:

- уменьшение наружного радиуса в допустимых пределах в процессе изготовления опоры приводит к уменьшению толщины несущего слоя (рис. 4.4) (нарушению точности позиционирования). Это объясняется уменьшением эффективной площади опоры и снижением нагрузочной способностью;

- на изменение зазора влияет его номинальное значение, например, изменение зазора при номинале в 40 мкм примерно в два раза больше чем при номинале 20 мкм;

- увеличение номинального размера внутреннего радиуса (уменьшение ширины опорной перемычки) приводит тоже к изменению зазора в большую сторону (рис. 4.5). Это тоже объясняется увеличением эффективной площади опоры.

Проведем количественную оценку влияния геометрических параметров на точность позиционирования подвижной части опоры, обусловленной отклонениями наружного радиуса.

Наружный радиус гидростатической опоры относится к свободным (несопрягаемым) размерам. В конструкторской документации такие размеры нормируют, как правило, по точному, среднему или грубому классам точности по ГОСТ 30893.2-2002 [148] или по 12, 14 или 16 квалитетам точности по ГОСТ 25346-2013 [149]. На практике при изготовлении гидростатических опор (с учетом повышенных требований к опорным поверхностям и толщине несущего слоя, величина которого составляет 20 – 60 мкм) завышаются требования и к размерам опоры.

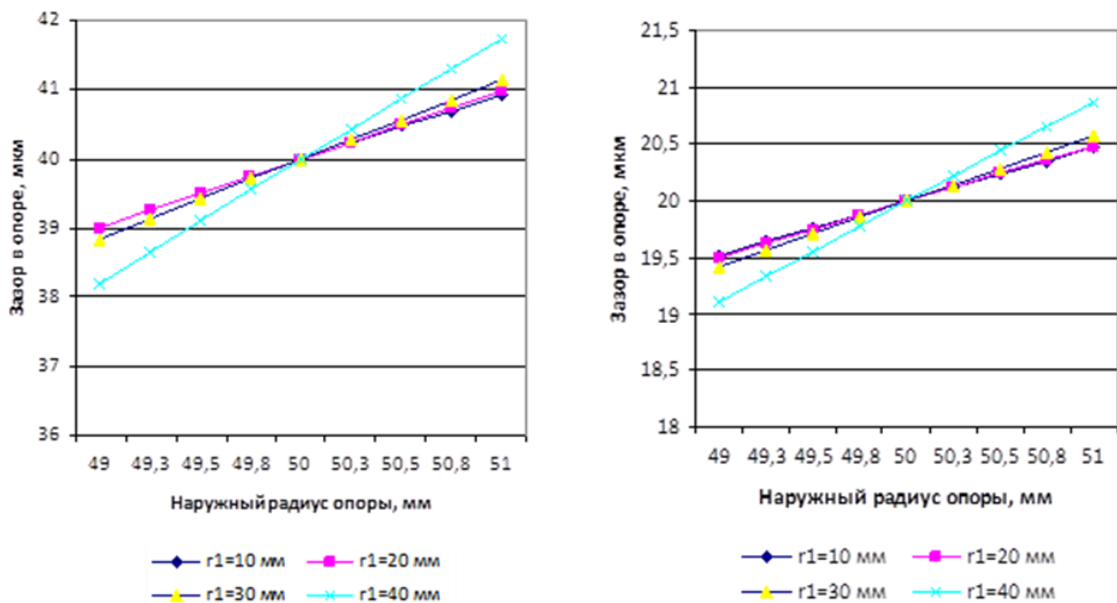


Рисунок 4.5 – Влияние отклонения наружного радиуса опоры r_0 (мм) на измерения зазора h (мкм) при различных номинальных значениях внутреннего радиуса r_1 (мм)

Абсолютные значения изменения зазора не позволяют сравнивать опоры с различными номинальными параметрами, поэтому рассмотрим, как изменяется зазор в отношении к его номинальному размеру в процентах. Так при нормировании наружного радиуса $r_0 = 25$ мм по 14 квалитету и номинальному

внутреннему радиусу $r_1 = 12,5$ мм изменение зазора составит 3 % от его номинального значения для всех исследуемых величин (20, 30 и 40 мкм, см. рис. 4.4). Увеличение номинального значения внутреннего радиуса r_1 опоры (уменьшение ширины опорной перемычки) усилит влияние погрешности изготовления наружного радиуса на отклонение зазора (см. рис. 4.5).

Расчеты показывают, что в исследуемом диапазоне параметров гидростатической опоры при изготовлении наружного радиуса по 12 качеству максимальное отклонение зазора не будет превышать 2 % от его номинального значения, по 14 качеству – 5 %, по 16 качеству – 8 %. Ужесточение точности изготовления наружного радиуса ниже 12 качества нецелесообразно.

Влияние погрешности изготовления внутреннего радиуса r_1 на характеристики опоры.

По аналогии с (4.11) и (4.12) получим формулы для исследования погрешности внутреннего радиуса на положение подвижной части опоры

$$p_{Rk} = \frac{(r_0^2 - r_1^2) \ln(r_0 / r_{1R})}{(r_0^2 - r_{1R}^2) \ln(r_0 / r_1)} p_k \quad (4.13)$$

p_{Rk} – соответствующее ему изменённое давление в кармане.

$$h_R = \sqrt[3]{\frac{6\mu \ln(r_0 / r_{1R}) R_d (p_s - p_{Rk})}{\pi p_{Rk}}}. \quad (4.14)$$

При этом изменившийся расход можно найти по формуле

$$q_{Rh} = \frac{\pi h_R^3 p_{Rk}}{6\mu \ln(r_0 / r_{1R})}.$$

Исследования проведены для опоры с наружным радиусом 50 мм при номинальных значениях зазоров 20, 30, и 40 мкм. Определялось влияние отклонений внутреннего радиуса опоры r_1 на положение подвижной части опоры при различных значениях его номинального значения.

Результаты исследования представлены на рис. 4.6. 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. Поясним, на рис 4.6, а и 4.6, б изменение зазора (положение подвижной части опоры) увеличивается с увеличением с погрешности внутреннего диаметра, а на рис. 4.6, г показано, что аналогичная функция убывает.

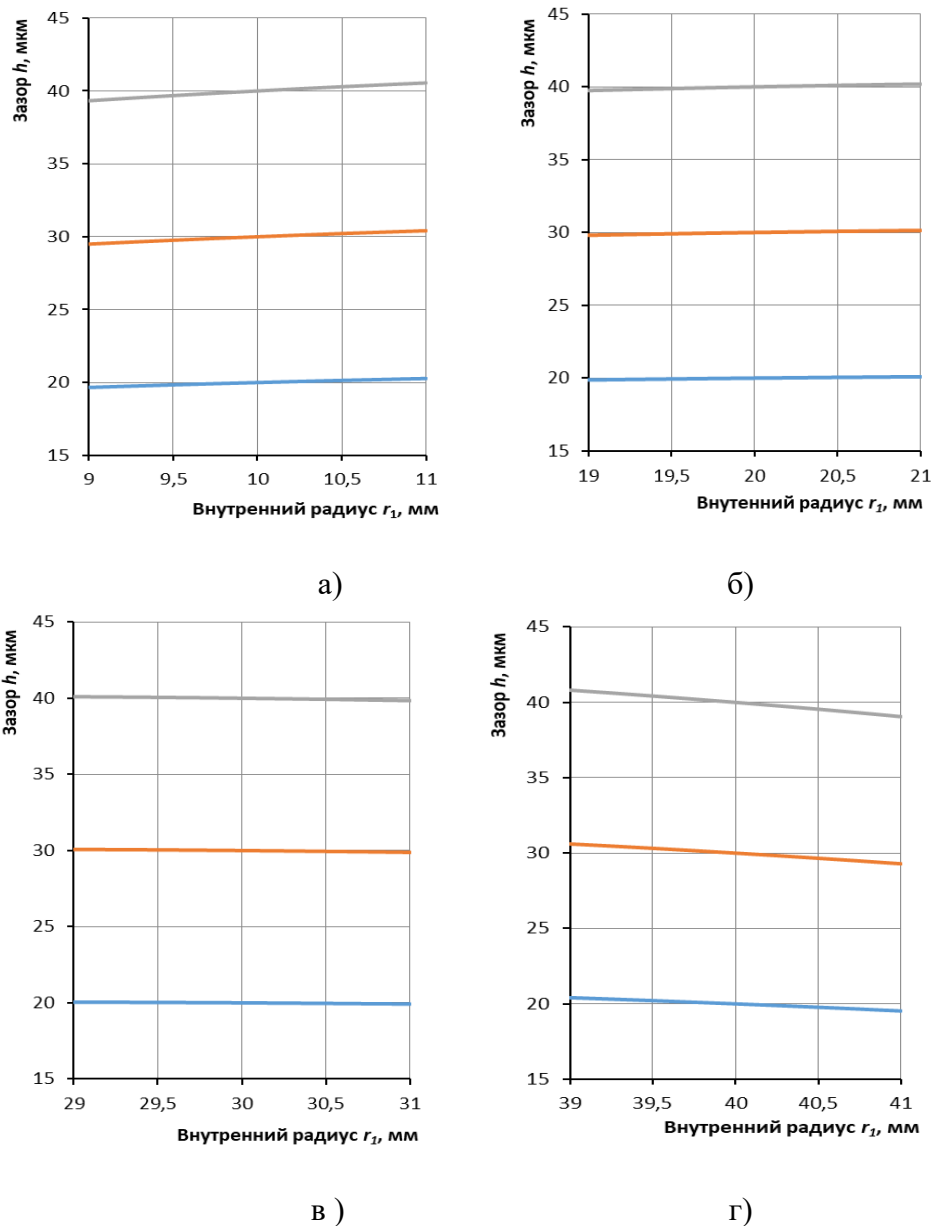


Рисунок 4.6. – Влияние отклонения внутреннего радиуса опоры r_1 (мм) на измерения зазора h (мкм) при различных значениях номинального зазора h_0 (мкм)
а) внутренний радиус 10 мм; б) - 20 мм; в) - 30 мм г) - 40 мм

Для нахождения оптимальных параметров опоры проведена их оптимизация. Из последних четырёх графиков видно, что зависимости $h_R (r_{1R})$ монотонны и могут быть как возрастающими, так и убывающими. Следовательно, при фиксированном значении давления в кармане и определенном r_1 эти зависимости будут практически постоянными в окрестности этого значения. Режим работы опоры, соответствующий данному радиусу, представляет практический интерес, поскольку отвечает минимальному значению погрешности.

Для нахождения оптимального с точки зрения минимума погрешности значения внутреннего радиуса приведем расчетные формулы к безразмерному виду, приняв за масштабы давление p_s для давлений и радиус r_0 для радиусов. Безразмерные величины будем обозначать соответствующими прописными буквами.

Поскольку зависимости зазора и куба зазора имеют одинаковый характер монотонности, то для удобства выкладок оптимизации подвергнем зависимость $H_R^3(R_{1R})$ безразмерными аналогами (4.13) и (4.14) являются зависимости

$$P_{kR} = A \frac{\ln(R_{1R})}{(1 - R_{1R}^2)}, \quad (4.15)$$

$$Z = H_R^3 = B \ln(R_{1R})(1 - P_{Rk}). \quad (4.16)$$

где $A = \frac{(1 - R_1^2) P_k}{\ln(R_1)}$.

Константа B не влияет на оптимальное значение радиуса R_1 , поскольку отыскивается режим, при котором в оптимальной точке производная от искомой функции обращается в нуль и, следовательно, этот коэффициент можно сократить. В малой окрестности искомой точки реальный радиус мало отличается от номинального, следовательно, его можно представить в виде $R_{1R} = R_1 + \Delta$, где Δ

– малая величина. Ввиду малости Δ разложим (4.15), (4.16) в окрестности искомой точки в ряд Тейлора с удерживанием первых двух членов, которые будут коэффициентами касательной прямой к кривой (4.16).

Дифференцируя (4.16), найдем

$$\frac{\partial Z}{\partial \Delta}(P_k, R_1) = \frac{1}{R_1}(1 - P_k) + \frac{\ln R_1}{P_k^2} \frac{\partial P_{kR}}{\partial \Delta}. \quad (4.17)$$

Выражение (4.17) представляет коэффициент при втором члене разложения функции (4.16). Оптимальным будет значения давления P_k и радиуса R_1 , при которых (4.17) обращается в нуль, что соответствует касательной

$$Z(\Delta) = Z(P_k, R_1) + \frac{\partial Z}{\partial \Delta}(P_k, R_1) \cdot \Delta,$$

представляющей линейную постоянную функцию. Найдем также

$$\frac{\partial P_{kR}}{\partial \Delta} = \frac{P_k(1 - R_1^2 + 2R_1^2 \ln R_1)}{\ln R_1(1 - R_1^2)^2}. \quad (4.18)$$

Подставив (4.18) в (4.17), выполнив упрощения и приравняв упрощенное выражение к нулю, получим уравнение

$$P_k + \frac{2R_1^2 \ln R_1}{(1 - R_1^2)} = 0. \quad (4.19)$$

Из (4.19) следует, что оптимальный безразмерный внутренний радиус зависит только от значения безразмерного давления в кармане. Справедливо также противоположное утверждение – оптимальное безразмерное давление в кармане определяется лишь безразмерным внутренним радиусом подпятника

$$P_k = \frac{2R_1^2 \ln R_1}{(R_1^2 - 1)}. \quad (4.20)$$

Например, для $R_1 = 0,5$ оптимальным является $P_k = 0,46$, а для $P_k = 0,5$ оптимальным будет $R_1 = 0,53$.

С учетом (4.8), (4.20) формулы для безразмерной и размерной оптимальной несущей способности подпятника примут вид

$$W = \frac{w}{\pi r_0^2 p_s} = \frac{(R_1^2 - 1)P_k}{2 \ln R_1} = R_1^2, \quad w = \pi r_0^2 p_s W = \pi r_1^2 p_s. \quad (4.21)$$

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– нормирование точности наружного диаметра гидростатической опоры не следует ужесточать свыше 12 – 14 квалитетов, как и для большинства свободных размеров;

– 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 (см. рис. 4.7). При других параметрах опоры влияние внутреннего радиуса на положение подвижной части опоры следует проверять по выражению (4.14).

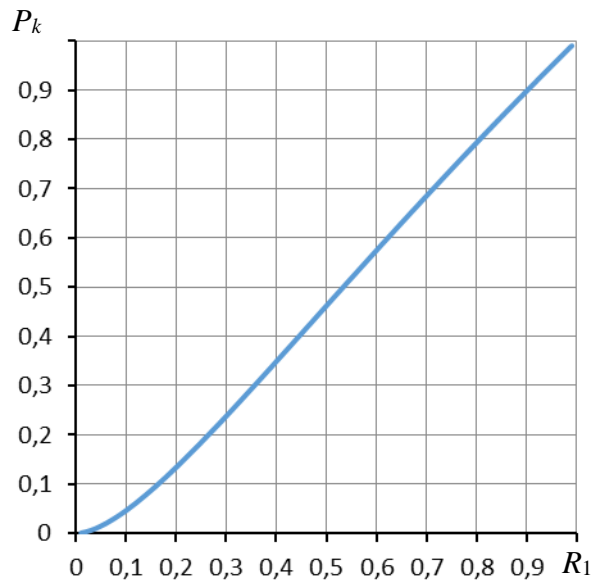


Рисунок 4.7. – График зависимости $P_k(R_1)$, построенный по формуле (4.20).

– уточненная математическая модель гидростатической опоры позволит повысить точность при проектировании подвижных узлов измерительного и испытательного оборудования.

4.4 Влияние отклонений расположения опорных поверхностей гидростатической опоры на ее характеристики

При использовании незамкнутой осевой гидростатической опоры в качестве вставок направляющих подвижных узлов прецизионного оборудования основным отклонением расположения является отклонение от параллельности опорных поверхностей, которое оценивается по наружному диаметру опоры. В отличие от газостатических исследования гидростатических опор с учетом погрешностей опорных поверхностей известны с раннего периода развития теории и практики в области гидростатики. Так опоры прямоугольной формы исследовали Герасимов А.Д., Артюхов Е.С. [150], Шульга А.К. [151]. Для многокамерных опор исследования проведены Пасынковым [152].

Наиболее близкими по сути к настоящим исследованиям являются работы Пуша В.Э., Фокина Г.В. [57], Бушуева В.В. [53], Шатохина С.Н. и Секацкого В.С. [83, 84, 153, 154 и др.].

В большинстве работ незамкнутая осевая гидростатическая опора рассматривалась в качестве осевого упорного подшипника. Исследователей интересовало на сколько погрешности опорных поверхностей будут влиять на осевое биение при вращении подвижной части опоры.

Для исследования гидростатических опор в качестве вставок для направляющих прецизионного оборудования воспользуемся теоретическими зависимостями, полученными в [83].

Сложность такого исследования заключалась в том, функция распределения давления зависит не только от радиуса опоры, но и от угловой координаты. Краевая задача для функции распределения давления имеет вид

$$R \frac{d}{dR} \left(H^3 R \frac{dP}{dR} \right) + \frac{d}{d\varphi} \left(H^3 \frac{dP}{d\varphi} \right) = 0; \quad (4.22)$$

Точного аналитического решения уравнения (4.22) получить не удастся поэтому авторы решали его с использованием допущений либо в описание функции распределения давления, либо функции изменения толщины несущего слоя. При использовании второго допущения (осреднение толщины несущего слоя по середине опорной перемычки) авторам удалось получить достаточно простые зависимости для нахождения расхода и несущей способности

$$Q = -\frac{\pi P_k}{6 \ln R_1} \left(H_\theta^3 + 1.5 H_\theta B^2 R_{cp}^2 \right); \quad (4.23)$$

$$W = 0,5 P_k \left(R_1^2 - 1 \right) / \ln R_1. \quad (4.24)$$

где $R_{cp} = 0,5(1+R_1)$;

$H_\theta = h_\theta/h_0$ – безразмерный параметр текущего значения толщины h_θ несущего слоя смазки, обусловленное отклонением от параллельности опорных поверхностей;

$B = \Delta/h_0$ – безразмерный параметр отклонения от параллельности опорных поверхностей Δ .

Расхождение в результатах, полученных первым и вторым способом не превышает 1 %.

На основании полученных в [83] зависимостей расхода смазки и несущей способности проведен анализ влияния отклонений от параллельности опорных поверхностей незамкнутой гидростатической опоры на изменение толщины

несущего слоя, т. е. на нарушение позиционирования подвижной части опоры, обусловленное изменением ее положения относительно неподвижной части.

Результаты расчета для номинального значения толщины несущего слоя 20 мкм приведены на рис. 4.8, а, а для толщины несущего слоя 40 мкм – на рис. 4.8,б.

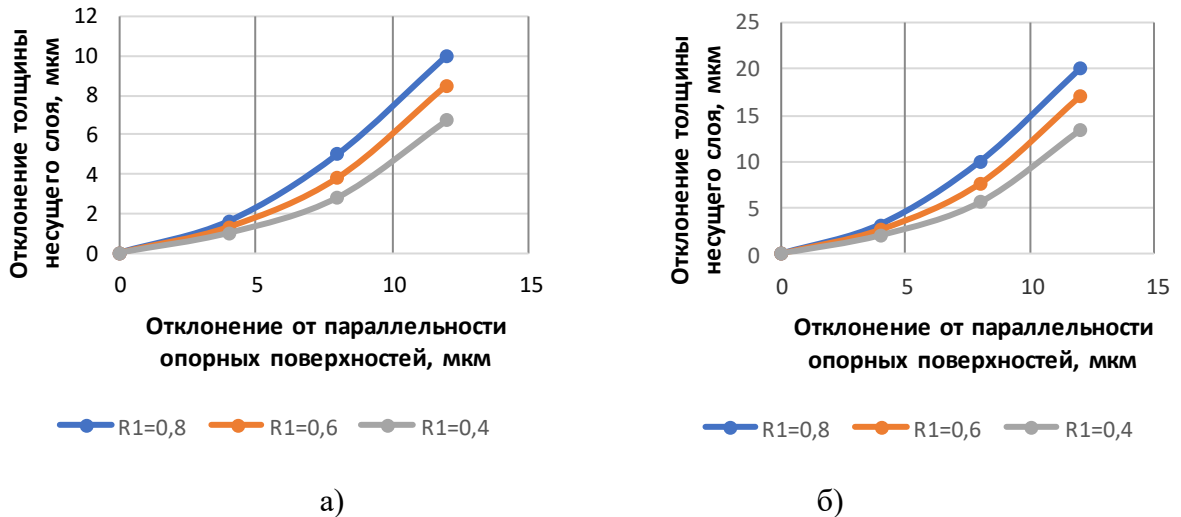


Рисунок 4.8. – Зависимость отклонения толщины несущего слоя от величины отклонения от параллельности опорных поверхностей незамкнутой гидростатической опоры:

а) – $h = 20$ мкм; б) – $h = 40$ мкм

Расчеты показывают, что отклонение толщины несущего слоя незамкнутой гидростатической опоры увеличивается с увеличением отклонения от параллельности опорных поверхностей и с увеличением ширины опорной перемычки. Увеличение номинального значения толщины несущего слоя в опоре приводят к пропорциональному увеличению исследуемой зависимости. Однако для выработки рекомендаций для их нормирования лучше пользоваться относительными зависимостями. 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 [140].

4.5. Влияние кругообразно направленной шероховатости опорных поверхностей на характеристики незамкнутого гидростатической опоры

К погрешности опорных поверхностей можно отнести как отклонение формы, так и шероховатость поверхностей. При механической обработке самих гидростатических опор величина и направление шероховатости опорных поверхностей зависят от типа опоры, способа механической обработки, режущего инструмента, режимов резания и др. Для круговых направляющих и упорных гидростатических подшипников – кругообразное или радиальное [155 – 158]. Исследования проведем на примере кругообразно направленной шероховатости [159–161]. Такая шероховатость получается при чистовом обтачивании опорных поверхностей поперечной подачей. Шероховатость по параметру R_a может меняться от 3,2 до 0,8 мкм [162]. По параметру R_z , который наиболее полно подходит к математической модели исследуемого подшипника, указанная выше шероховатость составит 12,5 – 3,2 мкм. Учитывая, что опорных поверхностей две, суммарная высота микронеровностей может быть соизмерима с величиной несущего слоя смазки.

Что касается среднего шага неровностей профиля, то он определяется в основном величиной подачи инструмента при обработке на металлорежущих станках и находится в пределах от 0,1 до 0,3 мм.

Исследования проведены на примере осевого гидростатического подшипника с центральной несущей камерой. Схема подшипника и его

параметры показаны на рис. 4.9. При нагнетании давления p_n в подшипник подвижная часть 2 поднимается на величину h_o . Сопротивление дросселя $R_{др}$ рассчитано исходя из условия $P_{к0}/P_n = 0,5$. Здесь $p_{к0}$ – давление в несущем кармане, соответствующее расчетному зазору h_o при гладких опорных поверхностях.

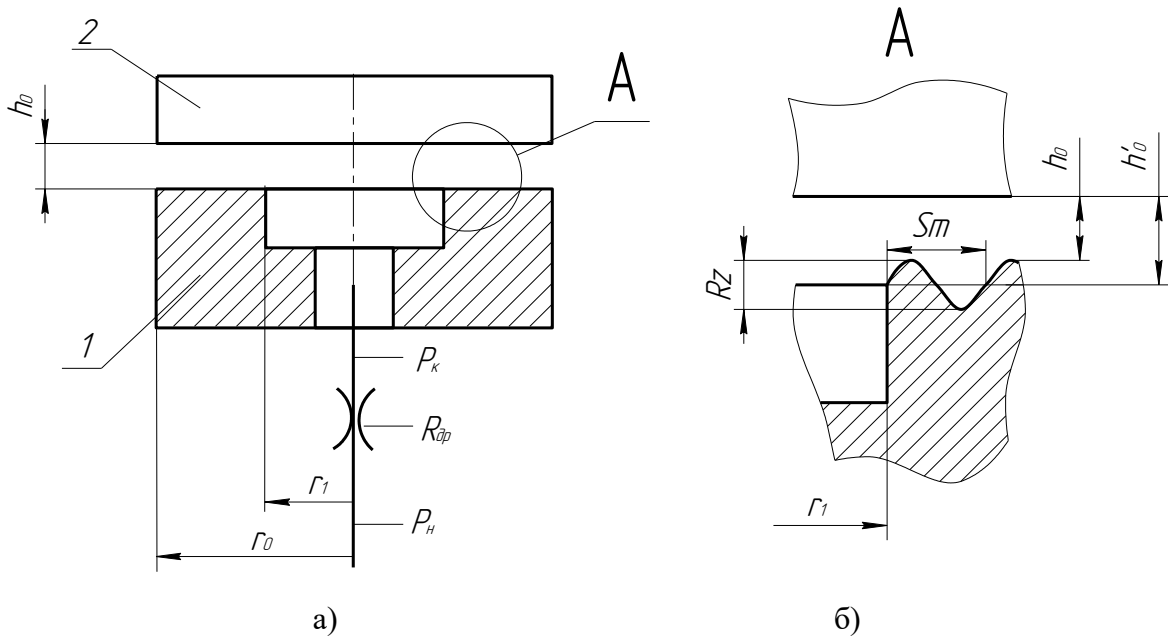


Рисунок. 4.9 – Гидростатический подшипник:

а) схема подшипника; б) форма опорной поверхности

С учетом шероховатости усредненный зазор будет иметь вид:

$$h'_o = h_o + R_z/2 \quad (4.25)$$

где R_z – высота шероховатости.

При круговом направлении шероховатости считаем, что толщина слоя смазки h_o не зависит от угловой координаты, а определяется текущим значением радиуса r_i подшипника на опорной перемычке, ограниченной наружным r_o и внутренним r_i радиусами. Таким образом, текущее значение толщины слоя смазки h_i можно представить следующей зависимостью:

$$h_i = h_0 + 0,5Rz \cos x, \quad (4.26)$$

$$\text{где } x = \frac{2\pi \cdot m(r_i - r_1)}{r_0 - r_1},$$

$m = (r_0 - r_1) / Sm$ – количество волн шероховатости на опорной перемычке подшипника;

Sm – средний шаг шероховатости.

Для большей общности результатов и для сокращения вычислений сравнительное исследование проводили в безразмерной форме. С учетом принятых допущений выражение, характеризующее зазор, будет иметь вид:

$$H_i = 1 + 0,5 \cdot RZ \cdot \cos \left[\frac{2\pi \cdot m(R_i - R_1)}{1 - R_1} \right], \quad (4.27)$$

$$\text{где } RZ = Rz / h_0.$$

Распределение давления P_i в несущем слое смазки незамкнутого осевого гидростатического подшипника, удовлетворяет решению частного вида дифференциального уравнения Рейнольдса (4.3) с граничными условиями

$$P|_{R=R_1} = P_k; \quad P|_{R=1} = 0, \quad (4.28)$$

где P_k и 0 – значения функций P_i на границах зазора.

Точное аналитическое решение уравнения (4.1) получить не удастся, поэтому для определения функции распределения давления смазки P_i используем метод прогонки.

От дифференциального уравнения (4.1) перейдем к конечно-разностному уравнению. Для этого разобьем отрезок $[R_1, 1]$ на n равных частей с шагом $\nu = \frac{1-R_1}{n}$. Полагая, что точки разбиения имеют абсциссы $R_i = R_1 + i \cdot \nu$, ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) и зная $P_0 = P_n = 0$, вместо дифференциального уравнения (4.1) получим систему конечно-разностных уравнений

$$H_i \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\nu} + R_i \left[H_i \frac{P_{i+1} - 2P_i + P_{i-1}}{\nu^2} + 3 \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{2\nu} \cdot \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\nu} \right] = 0 \quad (4.29)$$

относительно неизвестных $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{n-1}$.

Решение системы (4.29) будем искать в виде:

$$P_{i-1} = F_i P_i + V_i \quad (4.30)$$

где F_{i+1}, V_{i+1} - рекуррентные формулы для вычисления прогоночных коэффициентов.

$$F_{i+1} = \frac{A}{1 - BF_i}, \quad V_{i+1} = \frac{B \cdot V_i}{1 - BF_i} \quad (4.31)$$

Согласно уравнению (4.29), получим:

$$A = \left(\frac{\nu}{4R_i} + \frac{3(H_{i+1} - H_{i-1})}{8H_i} + \frac{1}{2} \right), \quad B = \left(-\frac{\nu}{4R_i} - \frac{3(H_{i+1} - H_{i-1})}{8H_i} + \frac{1}{2} \right) \quad (4.32)$$

Сравнив первое граничное условие (4.28) с (4.30), найдем начальные значения прогоночных коэффициентов:

$$F_1 = 0, \quad V_1 = P_k \quad (4.33)$$

Используя (4.33), (4.31) для $i = 1, 2, \dots, n-1$ прямым ходом через предыдущие последовательно найдем последующие значения прогоночных коэффициентов $F_2, V_2, F_3, V_3, \dots, F_{n-1}, V_{n-1}, F_n, V_n$.

Воспользовавшись вторым граничным условием (4.28), формулой (4.30) и известными прогоночными коэффициентами F_i, V_i , обратным ходом при $i = n, n-1, \dots, 2, 1$ найдем недостающие неизвестные значения функции $P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_n$.

Зная функцию распределения давлений P_i в несущем слое смазки рассматриваемого подшипника, определим несущую способность и расход смазки. Значение несущей способности на перемычке находили численным методом Симпсона:

$$W_{nep} = \frac{1-R_1}{3n} [P_0 + P_n + 2(P_2 + \dots + P_{n-2}) + 4(P_1 + \dots + P_{n-1})]. \quad (4.34)$$

Несущая способность гидростатического всего подшипника имеет вид:

$$W = W_{nep} + P_k R_1^2. \quad (4.35)$$

Расход смазки описывается формулой

$$Q = -\frac{H_0^3 R_1}{6} \cdot \left[\frac{-3P_0 + 4P_1 - P_2}{2\nu} \right]. \quad (4.36)$$

Дальнейшее исследование проводили с использованием программной реализации, составленной на языке Object Pascal в среде Delphi [163].

Для корректного сравнения полученных результатов несущей способности и расхода смазки, при различной шероховатости, и установления рекомендаций по допустимой шероховатости была определена относительная погрешность расчетов равная 10^{-6} .

На рис. 4.10 показано изменение давления смазки по ширине опорной перемычки. Из графиков видно, что на величину и форму распределения давления в большей степени влияет количество шагов шероховатости на ширине опорной перемычки, чем величина шероховатости. Это объясняется тем, что чем больше шагов шероховатости в пределах граничных условий (от P_k до 0), тем меньше перепад давления на каждом шаге.

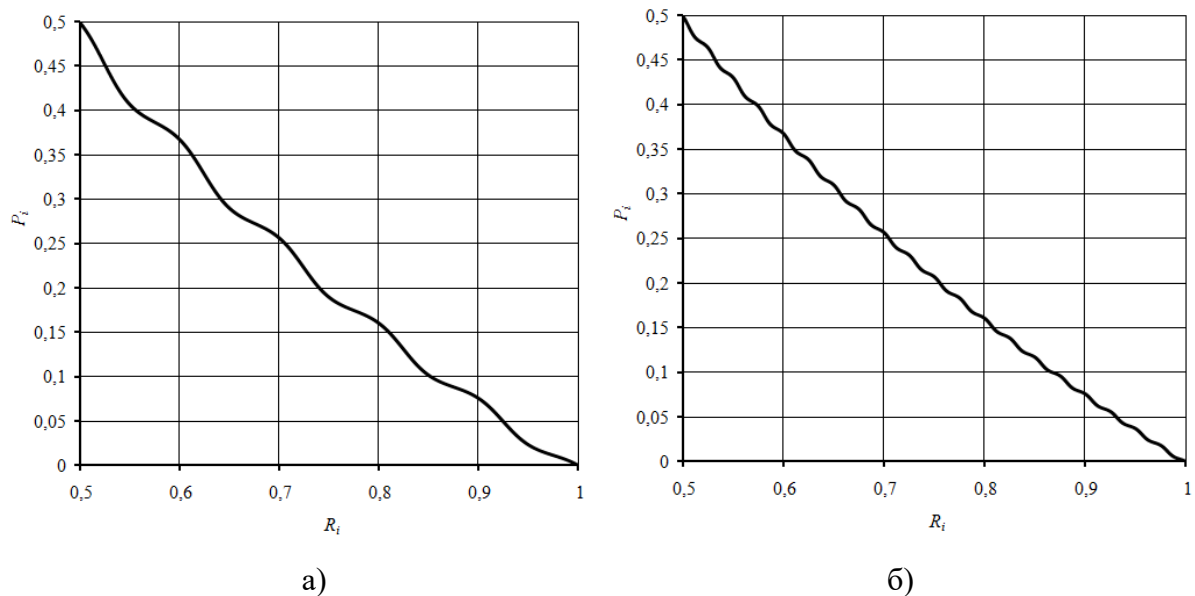


Рисунок 4.10. – Графики распределения давления по ширине опорной перемычки:

а – $m=5$ $RZ=0,4$; б – $m=20$ $RZ=0,4$

Аналогичная картина наблюдается и при оценке несущей способности гидростатической опоры (рис. 4.11, а).

На расход смазки шаговой параметр практически не влияет. Расход в большей степени зависит от величины шероховатости (рис. 4.11, б), так как в его выражение входит зазор в третьей степени.

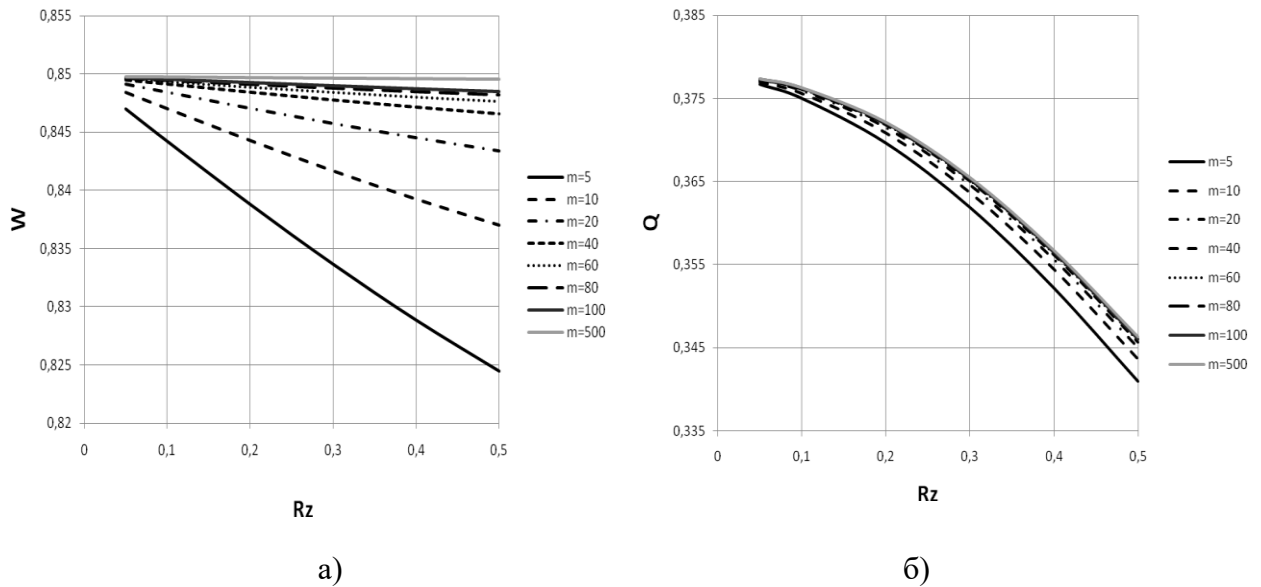


Рисунок 4.11. – Влияние шероховатости поверхности на:

а – несущую способность; б – расхода смазки

Из графиков видно, что при увеличении шероховатости и уменьшения количества волн происходит незначительное уменьшение несущей способности (0,1 – 0,3 %) и существенное уменьшение расхода смазки.

При переходе к размерным параметрам получим, что в гидростатическом подшипнике с номинальными параметрами $r_0=36$ мм, $r_l=18$ мм, $h_0=20$ мкм, $P_s=2$ МПа, $\mu=0,005$ Па·с изменение шероховатости в пределах от 0,05 до 0,4 приведет к изменению расхода смазки на $0,069 \cdot 10^{-6}$ л/мин (5,7%).

4.6 Разработка методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор

На основе полученных данных была разработана методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор, которая позволит

обоснованно нормировать точность геометрических параметров элементов опор на стадии их проектирования. Методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор приведена в Приложении 2.

Данная методика используются в учебном процессе СФУ при изучении контрольно-измерительного и испытательного оборудования (Приложение 3), а также внедрена в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва» (Приложение 4).

4.7. Выводы по четвертой главе

1. Усовершенствована математическая модель незамкнутой гидростатической опоры с центральной камерой, которая позволяет рассчитывать характеристики опоры с учетом геометрических отклонений опорных поверхностей.

2. Даны рекомендации по нормированию точности наружного диаметра гидростатической опоры. Показано, что при проектировании опоры наружный радиус опоры не следует ужесточать свыше 12 – 14 квалитетов.

3. Получены зависимости для выбора оптимального соотношения наружного и внутреннего радиусов с точки зрения минимизации влияния погрешностей на характеристики опоры.

4. Показано влияние отклонений от параллельности опорных поверхностей. Даны рекомендации для назначения допусков параллельности в зависимости от точности позиционирования подвижной части опоры.

5. Даны рекомендации по выбору шероховатости опорных поверхностей.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Экспериментальная проверка газостатической опоры

Экспериментальная проверка газостатической опоры проводилась с целью подтверждения справедливости теоретических выкладок. В процессе эксперимента оценивалось влияние толщины несущего слоя от внешней нагрузки при различных значениях давления нагнетания, влияние внешней нагрузки от диаметра дросселирующего сопла при различных значениях давления нагнетания и влияние пластин рельефа на несущую способность газостатической опоры.

5.1.1. Конструкция экспериментальной газостатической опоры

Экспериментальная газостатическая опора имеет систему двойного дросселирования воздуха в магистрали нагнетания. Данный способ дросселирования был предложен сотрудниками Красноярского политехнического института [106]. Двойное дросселирование является одним из наиболее удобных и эффективных способов улучшения динамического качества опоры, способствует стабилизации работы опор с активной компенсацией расхода на режимах малой, нулевой и отрицательной податливости.

На рис. 5.1.1. показан общий вид и конструкция исследуемой опоры.

Принцип работы газостатической опоры, следующий:

Воздух нагнетается под давлением $p_s = (0,0 \dots 0,8)$ МПа через штуцер 5, далее воздух поступает в полость корпуса 2, откуда через дросселирующее сопло d_p жиклера 3 попадает в распределительную кольцевую проточку и из неё через

двенадцать демпфирующих сопел d_k 8 типа «кольцевая диафрагма» поступает в несущий слой h , образованный поверхностью рельефной пластины и опорной поверхностью опоры 1. За счет нагнетаемого давления p_s и последующего дросселирования воздушной смазки через сопло d_p и двенадцать сопел 8 (d_k), опора всплывает, образуя несущий зазор h . Пробка 4 предназначена для создания герметичности полости нагнетания сжатого воздуха. Кроме этого, после выкручивания ее из корпуса, производится смена дросселирующего жиклера 3 (сопло d_p).

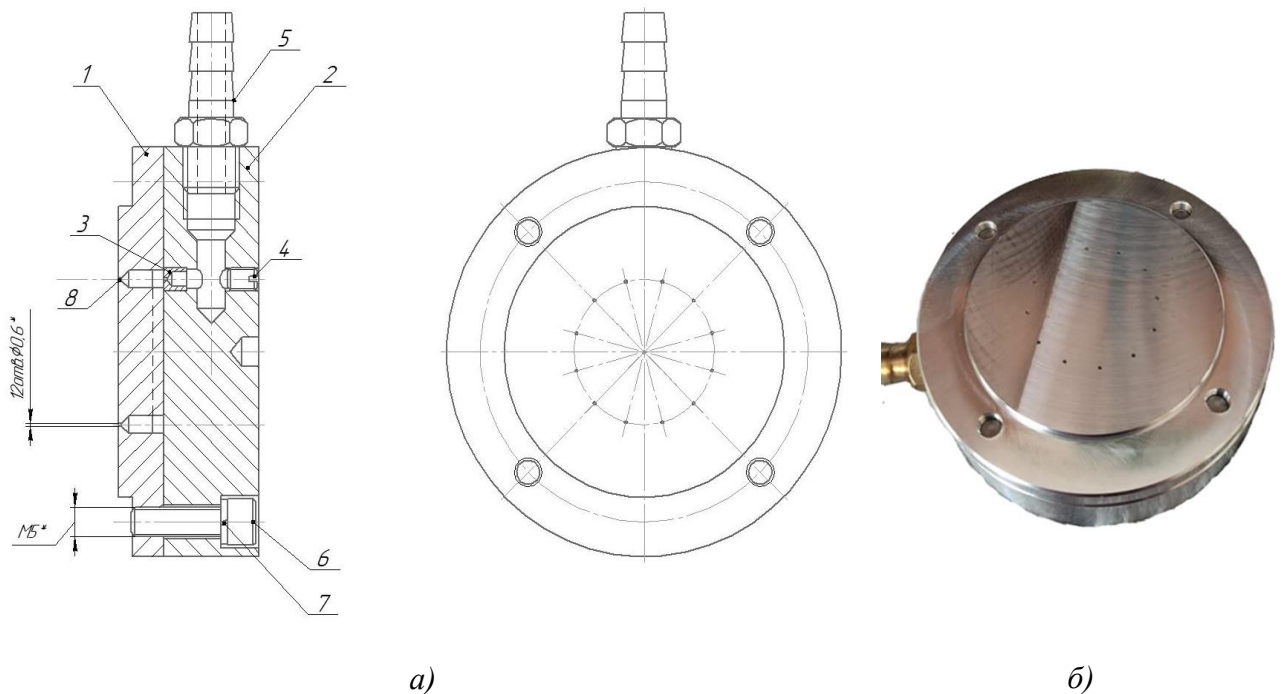


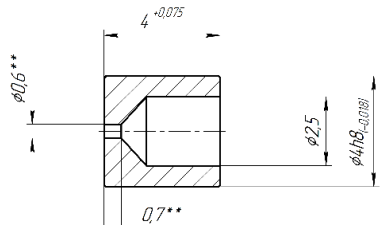
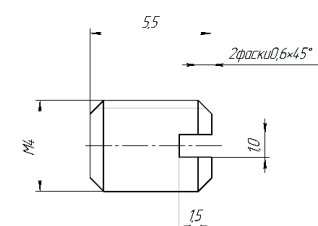
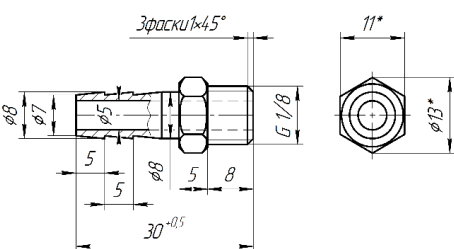
Рисунок 5.1.1. – Конструкция (а) и общий вид (б) экспериментальной газостатической опоры

Параметры для изготовления деталей экспериментальной газостатической опоры приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1– Параметры деталей экспериментальной газостатической опоры

Поз.	Чертёж
1	<p style="text-align: center;">Опора</p> <p>1 Острые края притупить фаской 0,4x45° 2 **Размеры расчетные уточнить по месту 3 Базовую поверхность притереть к поверхности корпуса АП-34.00.00.02 4. Н14; h14; ±IT14/2</p>
2	<p style="text-align: center;">Корпус опоры</p> <p>1 Острые края притупить фаской 0,4x45° 2 *Размеры для справок 3 Базовую поверхность А притереть к поверхности корпуса АП-34.00.00.01 4. Н14; h14; ±IT14/2</p>

Окончание таблицы 5.1

Поз.	Чертёж
3	<p style="text-align: center;">Жиклер</p>  <p>1. Острые внешние кромки притупить фаской $0,4 \times 45^\circ$ 2. **Размеры расчетные уточнить по месту 3. H14; h14; $\pm IT14/2$</p>
4	<p style="text-align: center;">Пробка</p>  <p>1. H14; h14; $\pm IT14/2$</p>
5	<p style="text-align: center;">Штуцер</p>  <p>1. Острые внешние кромки притупить фаской $0,4 \times 45^\circ$ 2. H14; h14; $\pm IT14/2$ Примечание. Деталь может быть покупной</p>

5.1.2. Установка для экспериментального исследования нагрузочных характеристик

Для экспериментальной проверки достоверности результатов теоретического исследования влияния рельефа поверхности на характеристики газостатической опоры на кафедре СМиУК была создана экспериментальная установка, общий вид и принципиальная схема которой показаны на рис. 5.1.2.

Система сжатого воздуха предназначена для подачи очищенного и осушённого воздуха в экспериментальную газостатическую опору, установленную на рельефной пластине. Воздух подается от компрессора СБ4-500 LT (рабочее давление до 1,0 МПа, расход до 1400 л/мин,) в систему очистки и осушки воздуха, проходит через осушитель, затем проходит через первичный

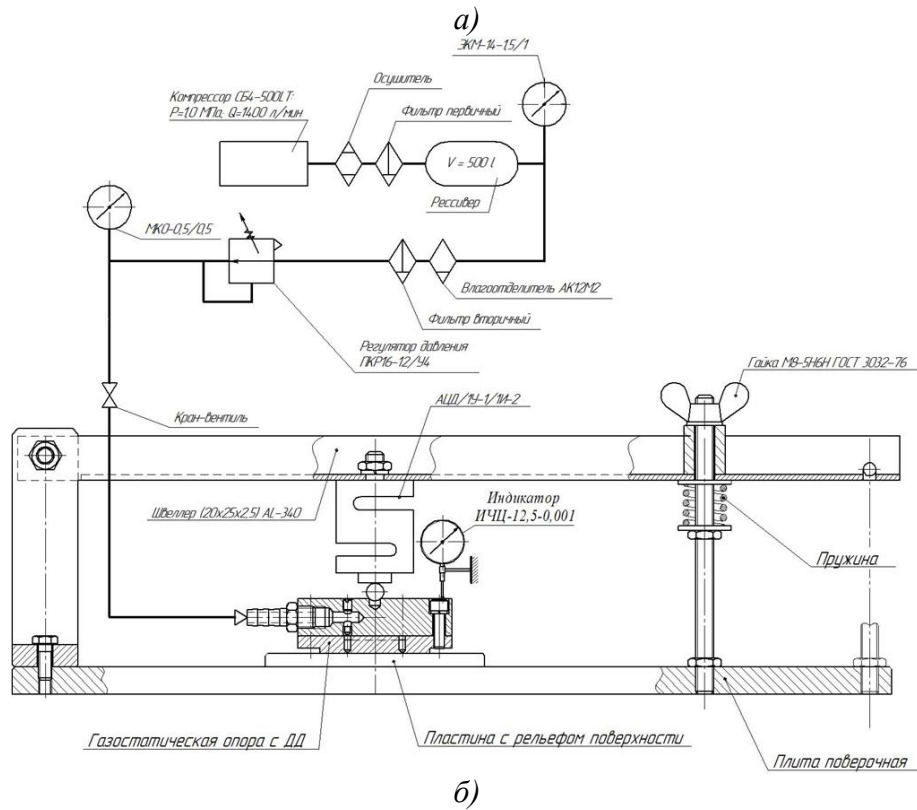
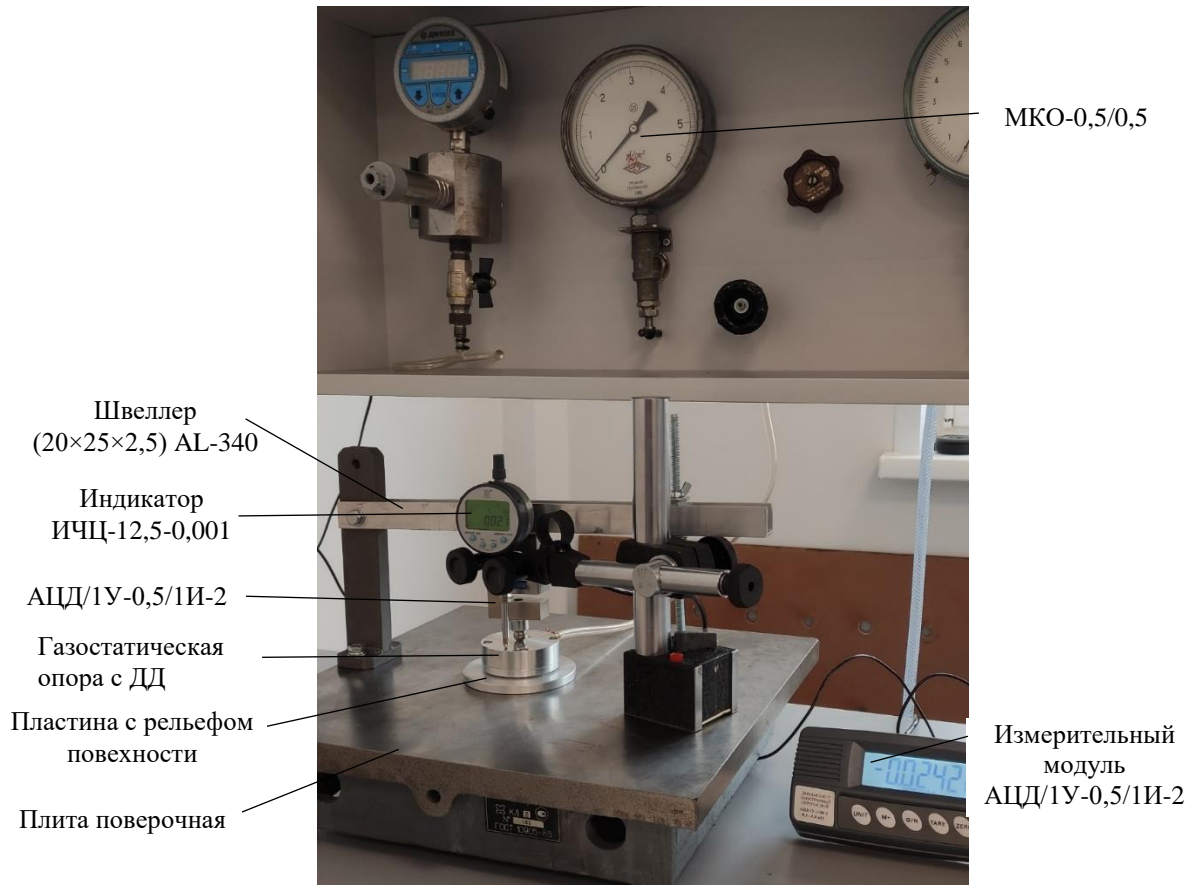


Рисунок 5.1.2. — Общий вид (а) и принципиальная схема (б) экспериментальной установки при исследовании влияния рельефа опорных поверхностей на характеристики газостатической опоры

фильтр грубой очистки. Для гашения колебаний давления, вызванных работой компрессора, воздух проходит через компрессорный ресивер – это герметичная емкость, которая предназначена для хранения сжатого воздуха, а также стабилизации давления в пневмосистеме (объем 0,5 м³). Давление нагнетания воздуха p_s измеряется с помощью манометра МКО-0,5/0,5. Далее воздух идет через влагоотделитель АК12М2 и фильтр вторичной тонкой очистки воздуха. С целью стабилизации давления воздуха p_s на заданных величинах, в системе подачи воздуха имеется регулятор давления ПКР16-12/У4 (номинальным давлением 1 МПа, объемным расходом воздуха 0,0166 м³/с). Далее поток воздуха поступает в опору, где последовательно проходит через основное дросселирующее сопло d_p и через двенадцать демпфирующих сопел d_k , в результате чего, опора всплывает, образуя несущий воздушный зазор h . Величину несущего зазора h регистрировали с помощью индикатора ИЧЦ-12,5-0,001.

Нагрузочное устройство состоит из кронштейна, швеллера, шпильки М8 с пружиной и нагрузочной гайкой-барашком. Измерение осевой нагрузки производили динамометрами АЦД/1У-1/1И-2 или АЦД/1У-0,5/1И-2.

Все средства измерения, используемые при экспериментальных исследованиях, имеют свидетельства поверки, подтверждающие их пригодность к измерениям в течении текущего года.

Экспериментальная установка, смонтирована на поверочной чугунной плите. Сменные динамометры АЦД/1У-1/1И-2 (пределы измерения от 0,1 – 1,0 кН, дискретность 0,2 Н) и АЦД/1У-0,5/1И-2 (пределы измерения от 0,05 – 0,5 кН, дискретность 0,1Н), которые используются в зависимости от диапазона действующей нагрузки f на экспериментальную опору с ДД.

На плиту устанавливаются поочередно пластины рельефа поверхности (рис. 5.1.3.).

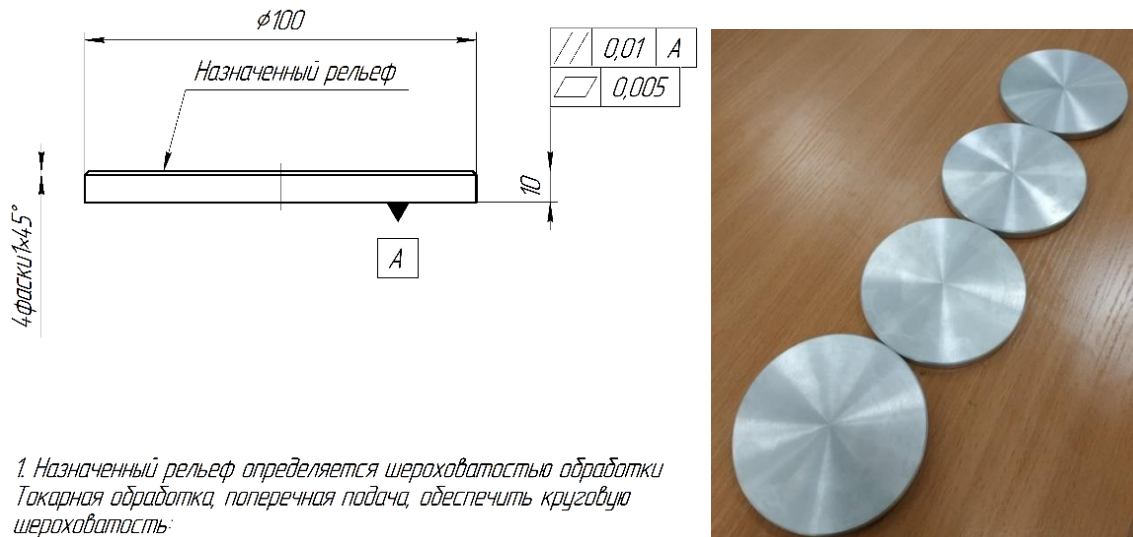


Рисунок 5.1.3. – Пластины рельефа

Назначенный рельеф задавали шероховатостью обработки: токарная обработка, поперечная подача, обеспечивает круговую шероховатость. Для эксперимента использовалось поочередно четыре пластины рельефа: №1 – Ra 1,6; №2 – Ra 3,2.; №3 – Ra 6,3; №4 – Ra 12,5.

Аттестацию изготовленных пластин проводили в лаборатории технических измерений кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством» ПИ СФУ с помощью профилометра TR200. Результаты обработки профиллограмм приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Наименование параметра	1 образец (Ra 1,6)	2 образец (Ra 3,2)	3 образец (Ra 6,3)	4 образец (Ra 12,5)
Измерения по 5 точкам Ra , мкм	1,653; 1,782; 1,695; 1,763; 1,778	3,465; 3,528; 3,186; 3,23; 3,308	6,425; 6,325; 6,118; 6,242; 6,444	12,66; 12,882; 12,68; 12,450; 13,003
Среднее значение Ra , мкм	1,73	3,3	6,311	12,735

5.1.3. Методика экспериментального исследования нагрузочных характеристик

При исследовании нагрузочных характеристик газостатической опоры с ДД в зависимости от поверхности рельефа, определяли зависимость внешней нагрузки f на изменение осевого зазора h .

Исходными данными принимали:

$p_s = (0,0 \dots 0,8)$ МПа – давление нагнетания сжатого воздуха;

$d_p = (0,6 \dots 1,5)$ мм, $d_k = 0,6$ мм – соответственно дросселирующее сопло и демпфирующие сопла типа «кольцевая диафрагма»;

$r_0 = 25$ мм – наружный радиус подпятника;

$r_1 = 12,5$ мм – радиус расположения демпфирующих сопел d_k , выходящих в несущий слой подпятника;

$m = 0,3$ кг – масса подвижного элемента газостатической опоры с ДД в сборе с шариком, штуцером и трубкой для подвода сжатого воздуха.

Нагрузочные характеристики газостатической опоры с ДД выполняли в следующем порядке: сжатый воздух от через штуцер корпуса подпятника поступал через сменный жиклер $d_p = (0,6 \dots 1,5)$ мм в междроссельную полость и затем через двенадцать демпфирующих сопел $d_k = 0,6$ мм, равномерно расположенных на опорной поверхности по окружности радиуса $r_1 = 12,5$ мм, в несущий слой. Давление нагнетания сжатого воздуха контролировали с помощью образцового манометра МКО-0,5/0,5. Регулятором ПКР16-12/У4 изменяли давление с 0,1 до 0,5 МПа до момента всплытия подпятника, это всплытие фиксировали с помощью индикатора ИЧЦ-12,5-0,001. Затем с помощью нагрузочного устройства, нагрузку f постепенно изменяли от веса пяты $f_0 = 2,94$ Н при толщине смазочного слоя h_0 до максимальной нагрузки f_{max} , при которой подвижный элемент подпятника соприкасается с неподвижной поверхностью рельефной пластины, когда толщина слоя смазки $h = 0,0$ мкм. При этом показания нагрузки f и изменение зазора h , измеряли соответственно динамометром

АЦД/1У-0,5/1И-2 и индикатором ИЧЦ-12,5-0,001. Измерения проводили при различных давлениях нагнетания P_s .

Далее пластину рельефа заменяли и эксперимент повторяли по аналогичной методике. Для получения достоверного результата каждый эксперимент повторяли не менее 5 раз.

5.1.4. Результаты экспериментального исследования

Требования к показателям точности. Точность проведения экспериментальных исследований определяется рядом факторов. Одним из основных является методика определения погрешности измерений, которая заключается в следующем:

1. Оценку измеряемой величины осуществляем в соответствие с требованиями ГОСТ Р 8.736-2011 [164]. Для оценки измеренного положения подвижной части гидростатической опоры при каждом значении отклонения от параллельности опорных поверхностей проводили по пять наблюдений, результаты которых заносили в таблицу протокола измерений. За оценку измеряемой величины \bar{h} принимаем среднее арифметическое значение из результатов измерений

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i, \quad (5.1)$$

где h_i – i -й результат измерений;

n – число измерений.

2. Для группы, содержащей n результатов определяем среднее квадратичное отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины) $S_{\bar{h}}$ по формуле:

$$S_{\bar{h}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n(n-1)}}. \quad (5.2)$$

3. Доверительные границы (без учета знака) случайной погрешности оценки измеряемой величины вычисляются по формуле

$$\Delta = t \cdot S_{\bar{h}} \quad (5.3)$$

При доверительной вероятности $P=0,95$ и числе наблюдений (измерений) $n=5$ коэффициент Стьюдента $t=2,78$.

4. При симметричных доверительных границах погрешности оценку измеряемой величины представляют в форме

$$h_{\text{э}} = \bar{h} \pm \Delta, \quad (5.4)$$

где $h_{\text{э}}$ – действительное значение толщины несущего слоя при заданной величине отклонения расположения опорных поверхностей гидростатического подшипника.

5. Расхождение теоретического и экспериментального значений определим по формуле

$$\partial = \frac{h_{\text{э}} - h_{\text{т}}}{h_{\text{т}}} 100\% \quad (5.5)$$

где $h_{\text{т}}$ – расчетное (теоретическое) значение толщины несущего слоя.

Исследования показали, что максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных во-всех экспериментах не превышает 4 %, что подтверждает правильность теоретической гипотезы и методики эксперимента. Сравнительные результаты теоретических (кривые линии) и экспериментальных (точки) исследований газостатической опоры приведены на рис. 5.1.4 – 5.1.6.

На рис. 5.1.4 показаны зависимости толщины несущего слоя h от внешней нагрузки f при различных значениях давления нагнетания p_s при расчетном зазоре $h_0 = 20$ мкм.

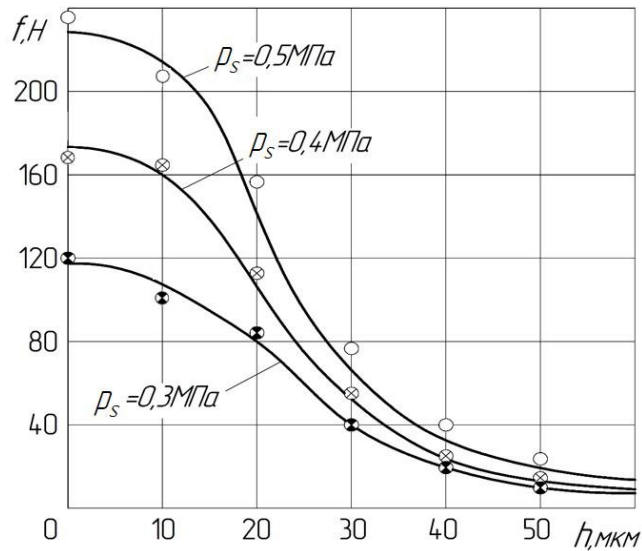


Рисунок 5.1.4. – Зависимости толщины несущего слоя h (мкм) от внешней нагрузки f (Н) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа)

На рис. 5.1.5 показаны зависимости внешней нагрузки f от диаметра дросселирующего сопла d_p при различных значениях давления нагнетания p_s . Из графика видно, что при увеличении давления нагнетания p_s в зависимости от диаметра дросселирующей диафрагмы d_p воздействие внешней нагрузки увеличивается. Эксперименты показывают, что наилучшие нагрузочные характеристики наблюдаются при $p_s = 0,5$ МПа и $d_p = 0,9$ мм.

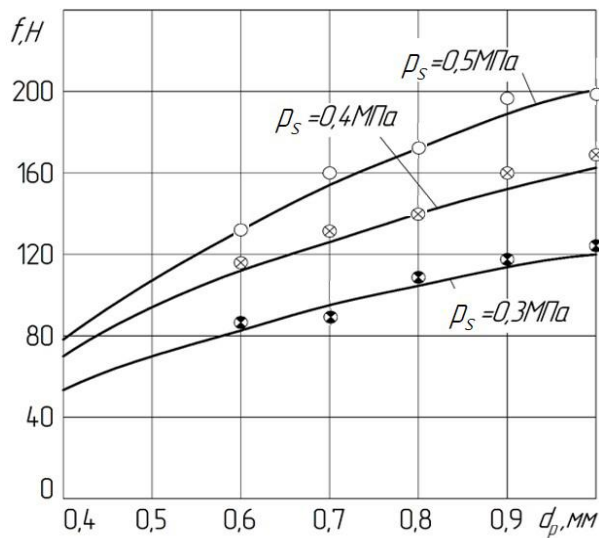


Рисунок 5.1.5. – Зависимости внешней нагрузки f (Н) от диаметра дросселирующего сопла d_p (мм) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа) при расчетном зазоре $h_0 = 20$ мкм.

Экспериментально подтверждены достоверность математической модели и расчетных зависимостей для определения характеристик газостатической опоры с двойным дросселированием. Исследование внешней нагрузки f (Н) от толщины несущего слоя h (мкм) (рисунок 5.1.4) и диаметра дросселирующего сопла d_p (мм) (рисунок 5.1.5) показали качественное совпадение теоретических и экспериментальных данных. Количественное расхождение лежит в пределах погрешности эксперимента.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных по несущей способности газостатической опоры в зависимости от пластин рельефа показало их полное качественное и удовлетворительное количественное совпадение (рис. 5.1.6).

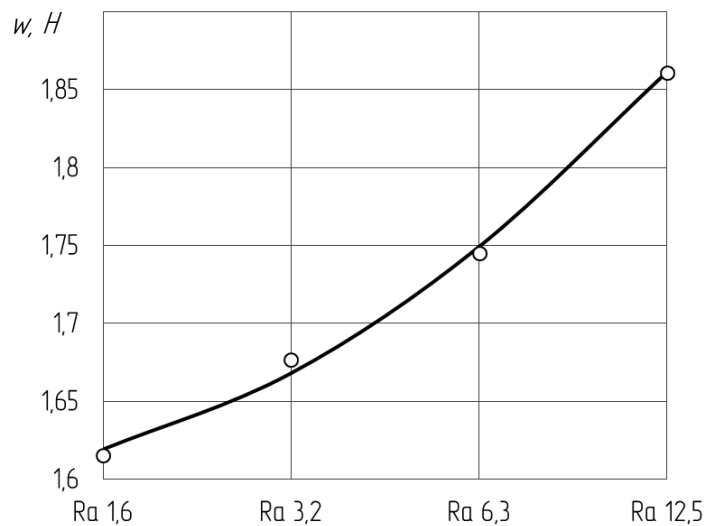


Рисунок 5.1.6. – Зависимость несущей способности w (Н) от пластин рельефа Ra

5.2 Экспериментальная проверка гидростатической опоры

Экспериментальная проверка гидростатической опоры проводилась с целью подтверждения справедливости теоретических выкладок. В процессе эксперимента оценивалось влияние отклонения от параллельности опорных

поверхностей гидростатической опоры на точность позиционирования подвижной части (на изменение толщины несущего слоя смазки).

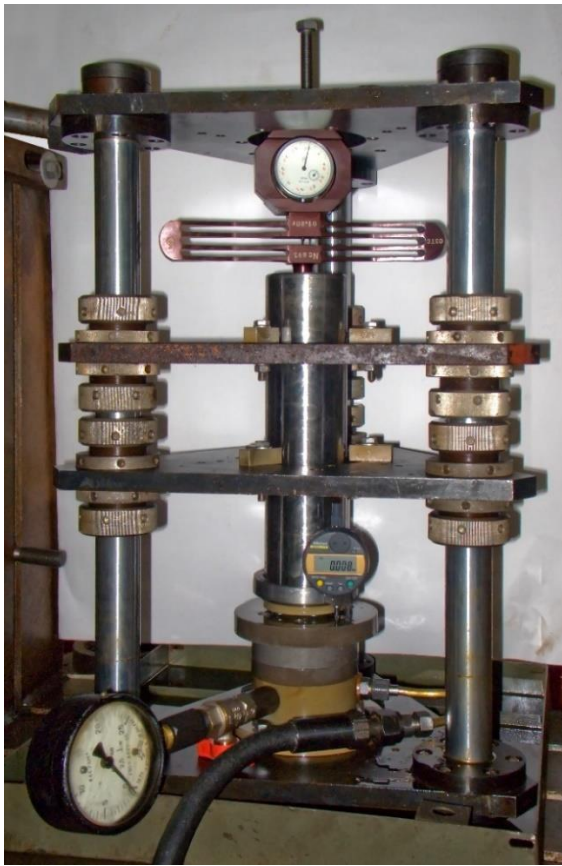
5.2.1 Стенд для экспериментального исследования гидростатической опоры

Экспериментальный стенд состоит из следующих основных узлов:

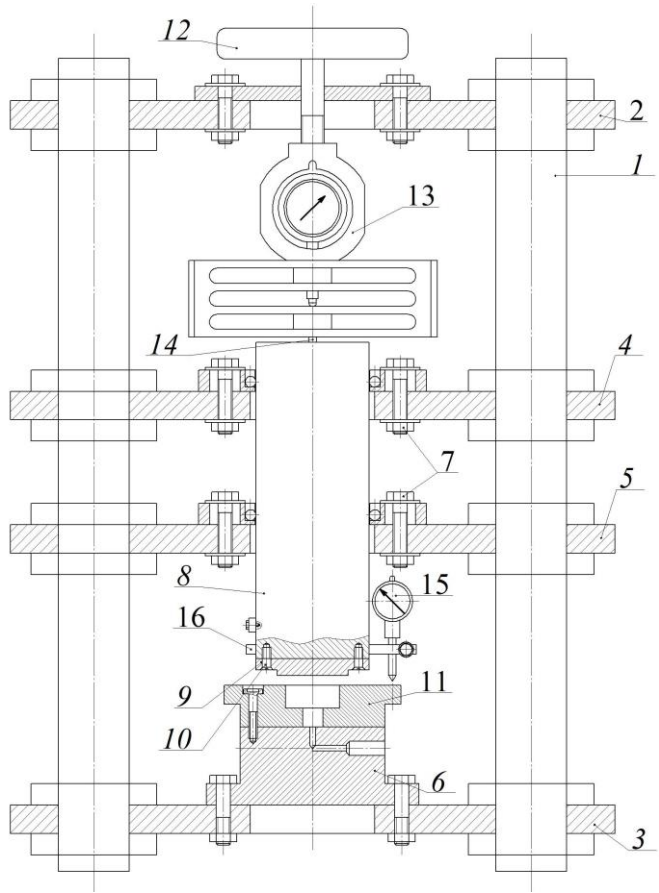
- шпиндельного узла с исследуемым гидростатическим подшипником;
- системы нагружения гидростатической опоры и регистрации исследуемых характеристик;
- системы подачи и очистки смазки.

Шпиндельный узел (рис. 5.2.1) состоит из несущей системы, на которой базируется опытный образец имитационной опоры. Несущую систему образуют три цилиндрические стойки 1, которые по концам связаны коническими замками с верхней 2 и нижней 3 плитами и образуют жесткую базовую конструкцию. В средней части на стойках с помощью цанговых зажимов базируются две промежуточные плиты 4 и 5. На нижней плите 3 закреплено основание 6 исследуемой гидростатической опоры. На промежуточных плитах закреплены шариковые осевые направляющие 7, в которых установлен подвижный вал 8 исследуемой гидростатической опоры. К валу 8 крепится пята 9 посредством винтов 10. На основание 6 исследуемой гидростатической опоры крепится подпятник 11 исследуемой гидростатической опоры. Через основание 6 осуществляется подвод жидкости в опору.

Система нагружения опоры представляет передачу винт-гайка 12, расположенной на верхней пластине 2 и жестко связанной с динамометром 13. Необходимая нагрузка на опору от динамометра 13 на вал 8 передается через сферу 14, что обеспечивает точечный контакт по оси опоры. Регистрация толщины несущего слоя в опоре осуществляется цифровым индикатором 15, который закреплен на валу 8 с помощью специального устройства 16.



а)



б)

Рис. 5.2.1 – Экспериментальный стенд для исследования гидростатической опоры:

а – общий вид; б – схема стенда

Система подачи и очистки смазки (рисунок 5.2.2) включает стандартную гидростанцию марки Г48-22 (рабочее давление до 5МПа, расход 12л/мин, рабочая жидкость – минеральное масло И5, с вязкостью 20мПа·с), средства регулирования и контроля давления смазки и трубопроводы.

В качестве компенсатора рабочей жидкости на входе в несущую камеру гидростатического подшипника установлен регулируемый дроссель, который обеспечивает необходимое стационарное сопротивление во время проведения эксперимента. Контроль давления смазки осуществляется: в рабочей камере манометром-1; нагнетание нагнетания – манометром-2.

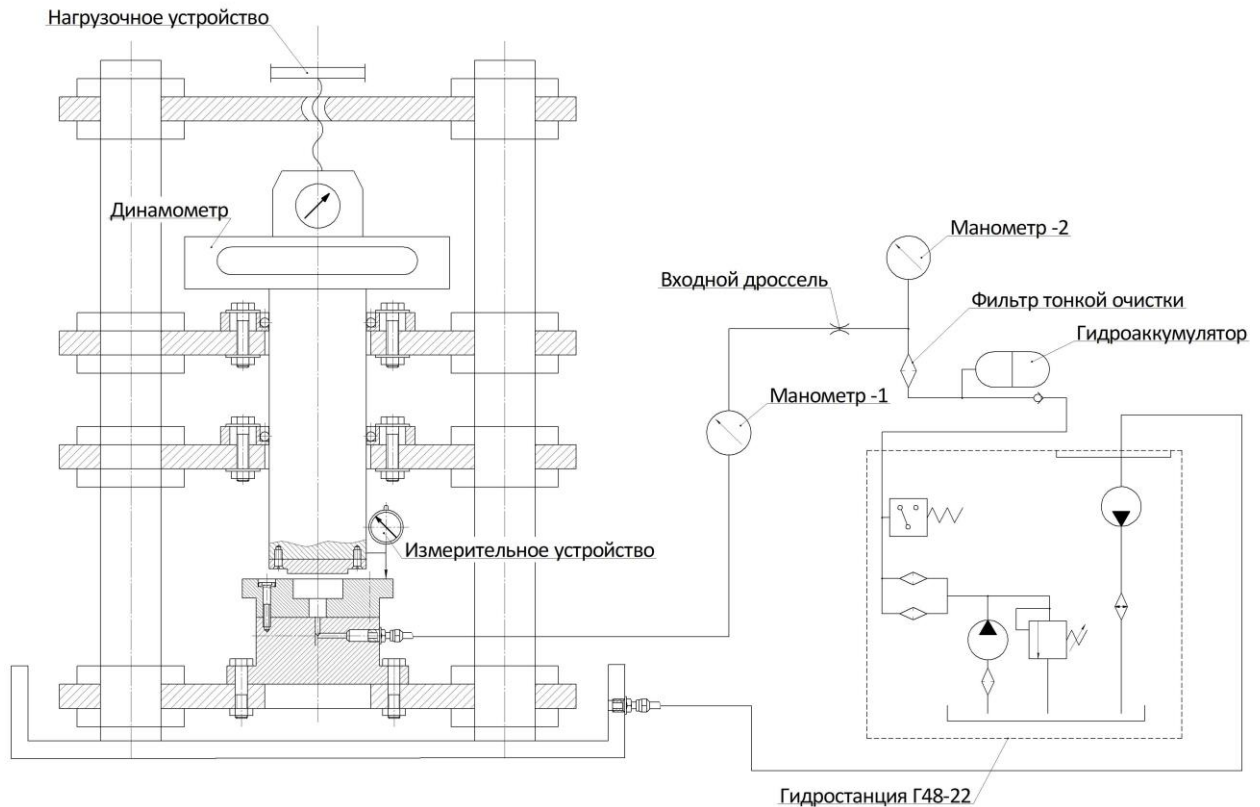


Рис. 5.2.2 – Система подачи и очистки смазки

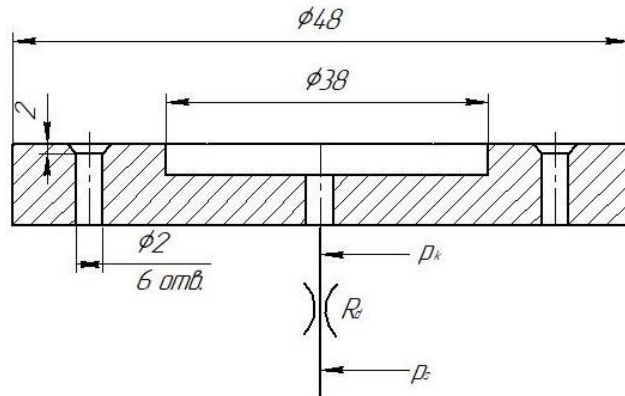
Гидравлическая станция содержит лопастной насос, фильтр грубой очистки, фильтр тонкой очистки. Необходимое давление в системе нагнетания устанавливается редукционным клапаном.

5.2.2 Методика проведения экспериментальных исследований

В результате экспериментальных исследований определяли влияние отклонения от параллельности опорных поверхностей на изменение положения подвижной части опоры, характеризующее точность позиционирования, и сравнивали с расчетными данными, полученными в ходе теоретических исследований.

Методика экспериментальных исследований строится на основе исходных данных, которые включают объект исследования, наименования исследуемых величин, требования к показателям точности, требования к условиям выполнения измерений, требования к средствам измерений характеристик опоры.

Объектом исследования является осевая незамкнутая гидростатическая опора с центральной камерой, подпятник которой приведен на рисунке 5.2.3.



a)



б)

Рисунок 5.2.3 – Конструкция (а) и общий вид (б) подпятника незамкнутой гидростатической опоры

Параметры гидростатической опоры:

наружный радиус опоры $r_0 = 24$ мм;

внутренний радиус опоры $r_1 = 19$ мм;

безразмерное значение внутреннего радиуса $R_1 = r_1 / r_0 = 0,8$;

номинальное давление смазки в магистрали нагнетания $p_s = 1$ МПа;

давление в рабочей камере опоры $p_k = 0,5$ МПа;

безразмерное значение давления в рабочей камере $P_k = p_k / p_s = 0,5$;

толщина несущего слоя смазки в момент настройки опоры (отклонение от параллельности опорных поверхностей равно нулю) $h = 20$ и 40 мкм.

К исследуемым величинам относится отклонение подвижной части опоры от ее номинального положения, определяемое толщиной несущего слоя смазки в момент настройки опоры h , вызванное отклонением от параллельности опорных поверхностей. Заданное отклонение от параллельности опорных поверхностей обеспечивается наклоном верхней опорной поверхности (пяты) за счет специальных прокладок. Величина отклонения от параллельности контролировалась по схеме, приведенной на рисунке 5.2.4.

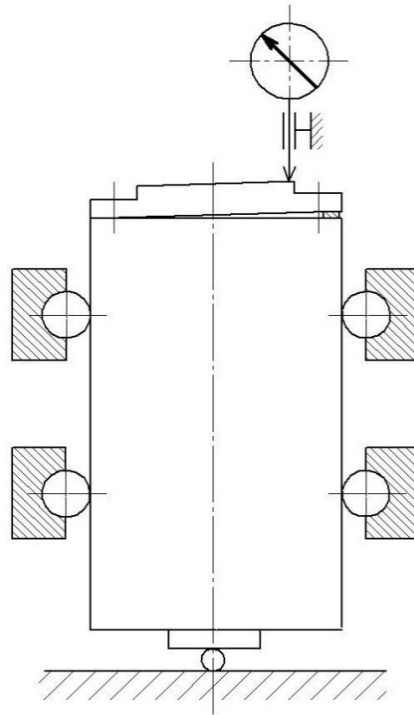


Рис. 5.2.4 – Схема контроля отклонения от параллельности

Требования к условиям проведения эксперимента:

- температура окружающего воздуха $(20 \pm 4) \text{ }^\circ\text{C}$;
- относительная влажность воздуха от 30 % до 80 %;
- атмосферное давление от 84 кПа до 106 кПа (от 630 до 800 мм.рт.ст.).

Требования к вспомогательным средствам измерений. Значения толщины несущего слоя в гидростатической опоре измеряли измерительной головкой ABSOLUTE Digimatic серии 543 производства компании Mitutoyo (Япония) абсолютным методом. Головка крепилась к подвижной части опоры с помощью специального кольца. Разрешение головки составляло 0,001 мм.

Размеры образцов деталей измеряли электронным штангенциркулем торговой марки TESA (Швейцария), диапазон измерения которого составляет 150 мм, дискретность отчета 0,01 мм, погрешность 0,02 мм.

Фиксация величины внешней нагрузки осуществлялась с помощью образцового переносного динамометра сжатия типа ДОСМ-03 системы Токаря. Погрешность измерения составляет 0,3 процента от измеряемой величины.

Давление нагнетания и давление в рабочей камере гидростатической опоры измеряли манометрами мод. МПЗ-У с диапазоном измерения 0 – 2,5 МПа, класс точности 1,5.

Подготовка к выполнению эксперимента. Перед проведением эксперимента настраиваем параметры гидростатической опоры на расчётные номинальные значения. Для этого при параллельных опорных поверхностях устанавливаем измерительную головку на ноль. Включаем гидравлическую станцию и с помощью редукционного клапана устанавливаем номинальное давление смазки в магистрали нагнетания $p_s = 1$ МПа. Далее с помощью регулируемого дросселя и нагрузочного устройства обеспечиваем давление в рабочей камере опоры $p_k = 0,5$ МПа и толщину несущего слоя смазки в момент настройки опоры $h = 20$ мкм. Величину нагрузки фиксируем по динамометру, толщину несущего слоя – по измерительной головке. Настройку дросселя в процессе эксперимента не меняем.

Порядок выполнения измерений. Установить заданное значение отклонения от параллельности опорных поверхностей гидростатической опоры. Схема контроля отклонения от параллельности приведена на рис. 5.2.4.

Собрать шпиндельный узел, включить гидравлическую станцию с давлением 1 МПа, установить зафиксированную ранее нагрузку на опору и по измерительной головке определить текущую толщину несущего слоя. Измерения провести пять раз.

5.2.3 Результаты экспериментального исследования

Обработка результатов измерений. Обработку результатов измерений произвести в следующей последовательности:

- по формуле (5.1) провести оценку измеряемой величины \bar{h} ;
- по формуле (5.2) определить среднее квадратичное отклонение оценки измеряемой величины;

- по формуле (5.3) рассчитать доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины;
- записать действительное значение измеряемой величины, полученной в результате эксперимента (формула 5.4);
- рассчитать по формуле (5.5) расхождение теоретического и экспериментального значений.

Экспериментальные исследования гидростатической опоры проведены при настройке дросселя на толщину несущего слоя 20 мкм и 40 мкм. Отклонение от параллельности опорных поверхностей составляло 4, и 12 мкм.

Результаты эксперимента и его обработки приведены для толщины несущего слоя 20 мкм в таблице 5.4, а для толщины несущего слоя 40 мкм в таблице 5.5.

Таблица 5.4 – Результаты эксперимента и обработки с номинальной толщиной несущего слоя смазки 20 мкм

h_T , мкм	Откл. от парал., мкм	Результат измерений, мкм					Расчеты по формулам (3.1 -3.5)				
		1	2	3	4	5	\bar{h}	$S_{\bar{h}}$	Δ	h_{Σ}	∂
18,5	4	18	18	17	18	19	18	0,32	0,88	17,12 18,88	2,7
15	8	15	14	14	15	15	14,6	0,24	0,66	13,94 15,26	2,6
10	12	10	10	11	11	10	10,4	0,24	0,66	9,742 11,06	4

Таблица 5.5 – Результаты эксперимента и обработки с номинальной толщиной несущего слоя смазки 40 мкм

h_T , мкм	Откл. от парал., мкм	Результат измерений, мкм					Расчеты по формулам (3.1 -3.5)				
		1	2	3	4	5	\bar{h}	$S_{\bar{h}}$	Δ	h_{Σ}	∂
37,5	4	37	37	38	37	38	37,4	0,24	0,66	36,74 38,06	0,3
30	8	29	30	30	29	30	29,6	0,24	0,66	28,94 30,26	1,3
20	12	20	19	20	20	19	19,6	0,24	0,66	18,94 20,26	2

Сравнение теоретических и экспериментальных данных гидростатической опоры показано на рисунке 5.2.5. Расхождение экспериментальных и теоретических значений не превышало 4 %, что говорит об удовлетворительном количественном совпадении.

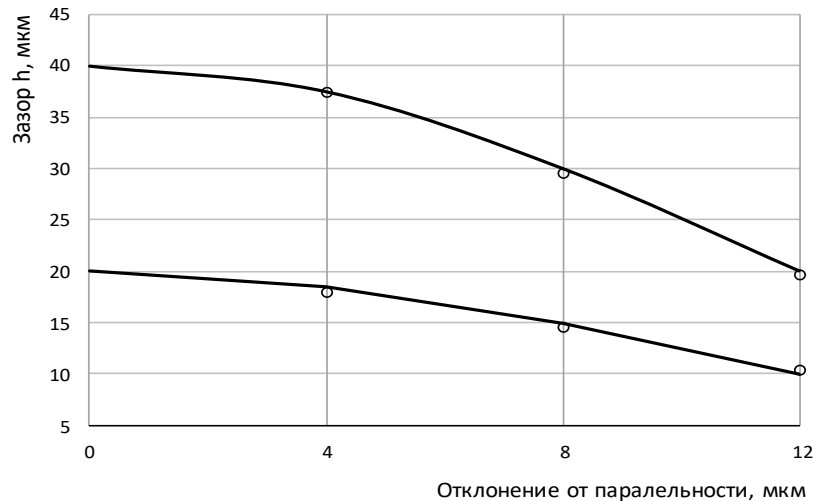


Рисунок 5.2.5 – Зависимость отклонения толщины несущего слоя от величины отклонения от параллельности опорных поверхностей незамкнутой гидростатической опоры

5.3. Выводы по пятой главе

1. Эксперименты показывают, что наилучшие нагрузочные характеристики наблюдаются при $p_s = 0,5$ МПа и $d_p = 0,9$ мм.
2. При исследовании нагрузочных характеристик газостатической опоры с двойным дросселированием с различными сочетаниями параметров p_s , d_p , d_k , а также параметров шероховатости Ra , не наблюдалось неустойчивого режима типа «пневмомолот».
3. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 4 %, что подтверждает правильность теоретической гипотезы и методики эксперимента.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сурков И.В., Мягкова М.В. Применение КИМ для контроля линейных и угловых параметров зубчатых колес // *Металлообработка* – 2007. – № 5. – С. 86–89.
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. Насырабади А. Классификация координатно-измерительных машин с применением аэростатических 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.
4. Лысенко, В.Г. Разработка и исследование системы обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров обработанных поверхностей: Дис. на соиск. учен. степ. доктора техн. наук. – Москва, 2005. – 438 с.
5. Горбач Ф.И., Макаров С.О. Координатно-измерительные машины: точность нового поколения // *Металлообработка*. 2009. № 3. Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://www.informdom.com/metallООbrabotka/2009.html>
6. Гапшис, А.А. Координатные измерительные машины и их применение / А.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов, В.-З.А. Раманаускас, Н.А. Серков, В.А. Чудов – М.: Машиностроение, – 1988. – 328 с.
7. КИМ LK. Координатно-измерительные машины Nikon metrology i vision beyond precision. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/27161020-Kim-lk-koordinatno-izmeritelnye-mashiny-nikon-metrology-i-vision-beyond-precision.html>
8. Лабораторное оборудование. Металлография. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://axalit.ru/sites/default/files/tovar_docs/aberlink.pdf
9. Сайт компании Carl Zeiss. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.zeiss.com

10. Сайт компании WENZEL Präzision. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wenzel-group.ru/company/>
11. Сайт компании Werth Messtechnik. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.werth.de/de/start/home.html>
12. Сайт компании Mitutoyo. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mitutoyo.ru/ru_ru/
13. Сайт компании Nikon Metrology. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nikonmetrology.com/en-us/>
14. Сайт компании Innovalia Metrology. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://m3.innovalia-metrology.com/>
15. Hexagon Metrology. Ваш путеводитель в мире промышленной метрологии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qualitet.su/?id=10808>
16. Производитель шестиосевых КИМ ООО Лапик. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lapic.ru/Stati/Otechestvennie_6_osevie_koordinatno_izmeritelnie_mashini___vazhneyshaya_sostavlyayushchaya_tekhnicheskogo_perevooruzheniya_mashinostroitelnih_predpriyatiy_Rossii/
17. Сайт компании КИМ-ПРЕЦИЗИОН. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kim-precision.narod.ru/>
18. Белоусов А. Координатно-измерительные машины российской компании МС-Инжиниринг // Вектор высоких технологий. – 2017. – №4 (33). – С. 18–21.
19. Григорьев С. Н. Опыт МГТУ «СТАНКИН» в разработке координатно-измерительных машин субмикронной точности / С.Н. Григорьев, Д.А. Мастеренко, М.Г. Ковальский, П.Н. Емельянов // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 12. – С. 25–30.
20. А.с. 1402729 СССР, F 16 C31/06. Аэростатическая опора для каменных направляющих координатно-измерительных машин /Лысенко И.И., Демидов В.Г., Исаев Н.И., Хорьков Н.А. 3855186/25-27; заявлено 07.02.1985; опубл. 15.06.1988, Бюл. 22. С. 3.

21. А.с. 1803711 СССР, G 01 В 5/03. Координатная измерительная машина / Баранов Г.А., Баранов А.Г., Абубекеров Р.А., Якубов М.С. 4858608/28; заявлено 16.08.1990; опубл. 23.03.1993, Бюл. 11. С. 3.

22. Пат. 2068984 Российская Федерация, МПК G 01 В 5/004. Координатно-измерительная машина / Цветков Г.А., Каган М.Г., Бычков Н.А., Костенко В.Д.; заявитель и патентообладатель Пермский. науч.-исслед. технологический ин-т. №4909354/28; заявл. 25.12.1990; опубл. 10.11.1996. 12 с.

23. А.с. 947616 СССР, G 01 В 5/008. Координатная измерительная машина / Мухин О.С. 2927365/25-28; заявлено 16.05.1980; опубл. 30.07.1982, Бюл. 28. С. 2.

24. Виброиспытательные системы компании SHINKEN. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://testpartner.ru/wp-content/uploads/2018/10/English_Catalogue_RUSLowS.pdf

25. Сайт компании Team Corporation. Опоры и сочленения для систем испытания на вибрацию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blms.ru/>

26. Виброиспытательное оборудование. Электродинамические вибростенды, системы ресурсных и комбинированных испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ptgk.ru/wp-content/uploads/2017/02/STI-vibroispytatelnoe-oborudovanie.pdf>

27. Электродинамические испытательные установки: вибрация и удары: каталог 6-ой международной выставки-конкурса средств измерений «MetrolExpo - 2010». / Федеральный информационный фонд отечественных и иностранных каталогов на промышленную продукцию. – Москва, 2010. – 57 с.

28. Испытательное оборудование: каталог выставки «Chip-Expo - 2007»: электроника, компоненты, оборудование, технологии. / Федеральный информационный фонд отечественных и иностранных каталогов на промышленную продукцию. – Москва, 2007. – 36 с.

29. Сайт компании DONGLING. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://donglingtest.ru/>

30. Каталог компании ETS Solutions. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://testts.ru/content/equipment/vibration/ets/pdf/ETS_Solution.pdf

31. Испытательная машина на усталость 8803. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.directindustry.com.ru/prod/instron/product-18463-1949431.html>

32. Сервогидравлические усталостные испытательные машины и системы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://studik.net/servogidravlicheskie-ustalostnye-ispytatelnye-mashiny-i-sistemy/>

33. Сервогидравлические вибростенды серии HV. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ostec-test.ru/catalog/equipment/ispytaniya-na-vozdeystvie-vibratsii/servogidravlicheskie-vibrostendy-serii-hv/>

34. Сервогидравлических динамических испытательных машинах серии LFV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.megank.ru/i/cat/mechanicheskie-ispytaniya/mechanicheskie-ispytaniya/servogidravlicheskie-mashiny/dlja-serii-lfv/napolnaja-mashina-lfv-2500>

35. Сайт компании ВИА. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bia-ru.com/>

36. Кузнецов, А.А. Перспектива применения гидравлического динамометра в различных отраслях авиадвигателестроения / А.А. Кузнецов, А.Н. Мурзин, М.А. Никифоров, Р.П. Резаев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 22-24 июня 2016 г. – Самара: Самарский университет, 2016. – С. 202 –203.

37. Пат. 2679926 Российская Федерация, МПК G 01 M 7/00. Электродинамический вибростенд [Текст] / Макаревич А.В., Сиволап В.В.; заявитель и патентообладатель Непубличное акционерное общество Специальное конструкторское бюро "Точрадиомаш". - № 2018116899; заявл. 07.05.2018; опубл.: 14.02.2019, Бюл. № 5. – 8 с.

38. Пат. 2134870 Российская Федерация, МПК G 01 M 17/00. Стенд для диагностики колесно-моторных блоков рельсовых транспортных средств [Текст] / Крауиньш П.Я., Смайлов С.А., Иоппа А.В., Гаврилин А.Н., Дружинин Н.В.,

Кочетков А.А., Богдан А.А.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет, ТОО "Системы и технологии" - №98110237/28; заявл. 27.05.1998; опубл.: 20.08.1999. – 6 с.

39. А.с. 549703 СССР, G 01 M 7/00, F 16 C 32/06. Гидростатическая опора вибростенда [Текст]/ Медовиков А.И., Шаблинский Г.Э., Гордеев А.В., Чаморцев И.С. – 2055593/28; заявлено 01.08.1974; опубл. 05.03.1977, Бюл. 9. – С. 2.

40. А.с. 629462 СССР, G 01 M 7/00, F 16 C 32/06. Гидростатическая опора вибростенда [Текст]/ Медовиков А.И., Шаблинский Г.Э., Гордеев А.В., Чаморцев И.С. – 2195988/28; заявлено 04.12.1975; опубл. 05.03.1977, Бюл. 9. – С. 3.

41. Пат. 2411482 Российская Федерация, МПК G 01 M 7/06. Трехкомпонентный вибростенд [Текст] / Меркулов С.С., Бодагова Г.Ф., Новиков А.Б., Новиков С.А., Скворчевский А.К., Белов С.С., Капитонова Г.А., Рубахина Н.В., Стрекалова Е.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт "Дельфин". - № 2008136744/28; заявл. 15.09.2008; опубл.: 10.02.2011, Бюл. № 4. – 7 с.

42. Пат. 2279045 Российская Федерация, МПК G 01 M 7/02. Низкочастотный вибростенд для пневмоопор [Текст] / Кочетов О.С., Кочетова М.О., Ходакова Т.Д., Шестернинов А.В., Шмаков В.Т.; заявитель и патентообладатель Кочетов О.С. - №2005102127/28; заявл. 31.01.2005; опубл.: 27.06.2006, Бюл. № 18. – 4 с.

43. Пат. 2134870 Российская Федерация, МПК G 01 M 17/00. Стенд для диагностики колесно-моторных блоков рельсовых транспортных средств [Текст] / Крауиньш П.Я., Смайлов С.А., Иоппа А.В., Гаврилин А.Н., Дружинин Н.В., Кочетков А.А., Богдан А.А.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет, ТОО "Системы и технологии" - №98110237/28; заявл. 27.05.1998; опубл.: 20.08.1999. – 6 с.

44. А.с. 244671 СССР, G 01 M. Подвижная система электродинамического вибростенда [Текст]/ Князевич В.И., Ганичев А.П. – 1229871/25-28; заявлено 27.03.1968; опубл. 16.10.1969, Бюл. 18. – С. 2.

45. Кац, С.М. Балансирные динамометры для измерения вращающего момента [Текст] / С.М. Кац. – М.-Л.: Госэнергоиздат., 1962. – 144 с.
46. Зверев, В.А. Большой телескоп азимутальный // Известия вузов. Приборостроение: к 110-летию СПбГУ ИТМО. – Т. 53 – № 3 – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – С. 39 – 50.
47. Большой телескоп азимутальный. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moisav.livejournal.com/237983.html>
48. Гидростатические специальные подшипники / Сайт компании ZOLLERN. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zollern.com/ru/>
49. Измерительные системы Talyrond 440/450. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.geo-ndt.ru/catalog-415-pribori-dlya-izmerenii-otklonenii-ot-kryglosti-kryglomeri/talyrond_440_450.htm
50. Риппел Г. Проектирование гидростатических подшипников. – М.: Машиностроение, 1967
51. Бушуев, В.В. Гидростатическая смазка в станках. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.
52. Бушуев, В.В. Гидростатические шпиндельные опоры тяжёлых расточных станков / В.В. Бушуев, О.К. Цыпунов, А.И. Федоров // Станки и инструмент. – 1984. – № 12. – С. 12–14.
53. Бушуев, В.В. Гидростатическая смазка в тяжелых станках. – М.: Машиностроение, 1979. – 89 с.
54. Бушуев, В.В. Исследование щелевых дросселей гидростатических подшипников / В.В. Бушуев, С.Ф. Голотвин // Станки и инструмент. – 1975. – № 11. – С. 12–15.
55. Решетов, Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова. // М.: Машиностроение, 1972. – Т.2 – 520 с.
56. Проников, А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник / Под ред. А.С. Проников, Е.И. Борисов, В.В. Бушуев // М.: Машиностроение, 1995. – Т. 2 – Ч.1 – 371 с

57. Пуш, В.Э. Точность гидростатических опор / В.Э. Пуш, Г.В. Фокин // Станки и инструмент. – 1966. – № 9. – С. 8–10.
58. Пуш, В.Э. Анализ характеристик гидростатических опор на основе аналогий / В.Э. Пуш, М.А. Шиманович // Станки и инструмент. – 1968. – №10. – С. 1–3.
59. Скубачевский, Г.С. Исследование гидростатических подшипников: сборник статей / Под ред. Г.С. Скубачевский – М.: Машиностроение, 1973. – 120 с.
60. Чурин, И.Н. Расчёт и конструирование гидростатических упорных подшипников // Станки и инструмент. – 1968. – № 10. – С. 1–3.
61. Lang, C.M. Parsiegla K. Scheibendrossel als vordrosse fur hydrostatische lager / C. M. Lang, K. Parsiegla // Olhydraul und Pheum, 1976. – P. 118, 120, 131–156.
62. Кутовой, А.В. Об определении расходных характеристик дросселей тяжело нагруженных гидростатических опор // Детали машин. – 1980. – № 31. – С. 114–116.
63. Герасимов, А.Д. Динамические характеристики гидростатической передачи червяк-рейка / А.Д. Герасимов, И.Н. Чурин // Станки и инструмент. – 1977. – № 11. – С. 24 – 26.
64. Ингерт, Г.Х. Динамические характеристики гидростатических опор / Г.Х. Ингерт, Б.Г. Лурье // Станки и инструмент. – 1972. – № 9. – С. 5–7.
65. Судзуки, К. Устойчивость работы гидростатических радиальных подшипников / К. Судзуки и др., пер. с япон. // Сэймицу ккай. – 1981, т. 47. – № 4. – С. 430–435.
66. Zeidan, F.Y. Cavitation leading to two phase fluid in a sguetze film damper / F.Y. Zeidan, J.M. Vance // Tribol. Trans. – 1989. – № 1. – P. 100–104.
67. Metman, K.J. Load capacity of multi-recess hydrostatic journal bearings at high eccentricities / K.J. Metman, E.A. Muijderman, G.J. van Heijningen, D.M. Halemane // Tribol. Int. – 1986. – № 1. – P. 2–34.
68. Шиманович, М.А. Малогабаритный скоростной шпиндельный узел с гидростатическими опорами шпинделя / М.А. Шиманович, В.В. Михайлов // Станки и инструмент. – 1982. – № 2. – С. 15–16

69. Шатохин, С.Н. Потери мощности, кавитация и нагрев смазки в высокоскоростных шпиндельных гидростатических подшипниках / В кн. «Опоры скольжения с внешним источником давления смазки (гидростатические, аэростатические)» под ред. С.Н. Шатохина, Красноярск: КрПИ, 1989. – С. 63–78.

70. Шатохин, С.Н. Расчёт статических характеристик ступенчатого гидростатического подпятника / С.Н. Шатохин, А.С. Тюриков, В.М. Петров // В кн. «Качество, надежность и долговечность в машиностроении». – Красноярск: ЦНТИ, 1970. – С. 11–17.

71. 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.

72. Коднянко, В.А. Нелинейный анализ переходных процессов в ступенчатом гидростатическом подпятнике / В.А. Коднянко, А.В. Суровцев, Л.В. Строк, Л.В. Гоголь, С.А. Белякова, О.А. Григорьева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Выпуск 10. – С. 546–555.

73. Хаймович, Я.М. Гидростатическая гайка с регулируемым зазором в резьбе / Я.М. Хаймович, Ю.А. Мигай // Станки и инструмент. – 1972. – № 9. – С. 9–10.

74. Прокофьев, В.Н. Жёсткость гидростатических опор / В.Н. Прокофьев, В.П. Морозов // Станки и инструмент. – 1971. – № 8. – С. 4–8.

75. Аграновский, С.Н. Автоматические системы управления гидростатической смазкой // Станки и инструмент. – 1976. – № 7. – С. 12–14.

76. Сухолуцкий, Ю.А. Динамическая жёсткость замкнутой гидростатической опоры с регулятором / Ю.А. Сухолуцкий, Г. Х. Ингерт, Б. Г. Лурье // Машиноведение. – 1983. – № 6. – С. 105–109.

77. Шиманович, М.А. Оптимизация гидростатических опор / Станки и инструмент. – 1971. – № 4. – С. 6–8.

78. Пуш, А.В. Оптимизация шпиндельных узлов на опорах скольжения / Станки и инструмент. – 1987. – № 7. – С. 12–16.

79. Кудряшов Л.В. Повышение эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов с гидростатическими опорами: дисс. ... канд. техн. наук, М.:Станкин, 1988. – 115 с.

80. Пат. 2508483 РФ на изобретение, кл. F16C 32/06, B23Q 1/38. Гидростатическая опора / С.Н. Шатохин; патентообладатель ФГБОУ ВПО СибГАУ. – №2012121017/11; заявл. 22.05.2012; опубл. 27.02.2014, Бюл. №6 – 6 с.: ил.

81. 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.

82. 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)

83. Секацкий В.С. Исследование точностных характеристик шпиндельных гидростатических подшипников прецизионных станков: дис. канд. техн. наук: 05.03.01. –Тула: Тульский политехнический институт, 1986. – 246 с.

84. Секацкий, В.С. Влияние погрешностей несущих поверхностей гидростатической опоры на точность вращения / В.С. Секацкий, С.Н. Шатохин // В кн. «Гидростатический принцип смазки – метод повышения качества и долговечности продукции», Хабаровск: ЦНТИ, 1980. – С. 19–22.

85. 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.

86. Пат. 2467217 РФ на изобретение, кл. F16C 17/18, F16C 32/06, B23Q 1/38. Гидростатический подшипник / Я.Ю. Пикалов, М.В. Брунгард, Ю.А. Пикалов,

Л.В. Строк; патентообладатель ФГАОУ ВПО СФУ. – №2011124428/11; заявл. 16.06.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. №32. – 6 с.: ил.

87. Пат. 2425261 РФ на изобретение, кл. F16C 17/18, F16C 32/06, B23Q 1/38. Гидростатический подшипник / М.В. Брунгард, Я.Ю. Пикалов, С.Н. Шатохин, Ю.А. Пикалов; патентообладатель ФГАОУ ВПО СФУ. – №2010116533/11; заявл. 26.04.2010; опубл. 26.04.2010, Бюл. №2.1 – 5 с.: ил.

88. Шейнберг, С.А. Основы теории и расчета аэродинамических опор: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.02. – Москва, 1949. – 210с.

89. Шейнберг, С.А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С.А. Шейнберг, В.П. Жедь, М.Д. Шишеев. – М.: Машиностроение, 1969. – 334 с.

90. Пинегин, С.В. Материалы опор с газовой смазкой / С.В. Пинегин, В.М. Гудченко. – М.: НИПмаш, 1972. – 114 с.

91. Пинегин, С.В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / С.В. Пинегин, Ю.Б. Табачников, И.Е. Сипенков. – М.: Наука, 1982. – 265 с.

92. Жедь, В.П. Применение в промышленности опор с газовой смазкой / В.П. Жедь, С.В. Пинегин, Ю.Б. Табачников // Станки и инструмент. – 1977. – № 12. – С. 1–3.

93. Табачников, Ю.Б. Плоские аэростатические опоры металлорежущих станков и приборов. – М.: НИИМАШ, 1973. – 75 с.

94. Галанов, Н.С. Автоматизация выбора оптимальных параметров аэростатических подшипников // Механизация и автоматизация производства. – 1972. – № 7. – С. 22–24.

95. Заблоцкий, Н.Д. Постановка нестационарных задач теории газовой смазки методом неравномерно распределенного наддува // Машиноведение. – 1981. – № 6. – С. 82–85.

96. Степанянц, Л.Г. Метод теоретического исследования газовых подшипников с внешним наддувом / Л.Г. Степанянц, Н.Д. Заблоцкий, И.Е. Сипенков // Проблемы трения и смазки. – 1969. – № 1. – С. 34–38.

97. Баласаньян, В.С. Определение угловой жесткости кольцевого аэростатического подпятника // *Машиноведение*. – 1977. – № 3. – С. 93–99.
98. Grinnell S.K., Richardson H.H. Design Study of Hydrostatic gas Bearing with Inherent Orifice Compensation // *ASME Trans.* – 1957. – №79 (1). – P. 11–21.
99. Константинеску В.Н. Газовая смазка. – М.: Машиностроение, 1968. – 709 с
100. Laub, J.H. Hydrostatic Gas Bearings // *ASME Trans.* – 1960. – Ser. D: *Journal of Basic Engineering*. – Vol.82. – P.276–286.
101. Mori, H. A theoretical investigation of pressure depression in externally pressurized gas-lubricated circular thrust bearings // *ASME Trans.* – 1967. – Ser. D. – Vol. 83. – № 2. – P.201–208.
102. Licht, L. Experimental study of the stability of an externally pressurized, gas-lubricated bearing / L. Licht, H.G. Elrod // *ASME Trans.* – 1966. – Ser. E. – Vol. 33. – № 1.
103. Пауэлла, Дж.У. Подшипники с газовой смазкой / под ред. Н.С. Грессема; пер. с англ.; под ред. С.А. Харламова. – М.: Мир, 1966. – 424 с.
104. Паттерсон, А. Обзор достижений в разработке гироскопов с газовыми подшипниками в Великобритании // *Труды ASME*. – 1968. – Серия F: Проблемы трения и смазки. – Т.90. – №4. – С. 87–100.
105. Шатохин, С.Н. Теория и методы проектирования адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих металлорежущих станков: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.02. – Красноярск: 2010. – 390 с.
106. А.с. 636427 СССР, F 16 C31/06. Газостатический подшипник / Коднянко В.А., Пикалов Ю.А., Тюриков А.С., Шатохин С.Н.; заявлено 11.03.1977; опубл. 1978, Бюл. 45. С. 2.
107. Коднянко, В.А. Характеристики радиального газостатического подшипника с демпфирующими камерами и регуляторами выходного потока смазки / В.А. Коднянко, О.А. Григорьева, Л.В. Гоголь, С.А. Белякова, Л.В. Строк, А.В. Суровцев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2021. – Вып. 8. – С. 174–183.

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

109. 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.

110. 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.

111. 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 научно-практической конференции (29 апреля 2021 г.) – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука». – 2021. – С. 9 – 20.

112. 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.

113. 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.

114. 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.

115. Коднянко, В.А. Податливость двухрядного радиального аэроstaticеского подшипника с регулятором выходного потока смазки / В.А. Коднянко, А.С. Курзаков, О.А. Григорьева, Л.В. Строк // Доклады III Всероссийской научно–технической конференции с международным участием «Борисовские чтения», Сибирский федеральный университет, Политехнический институт, Красноярск, 23 - 24 сентября 2021 г. – С. 229–233.

116. 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. – № 9, 121.

117. 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.

118. Пикалов Ю.А. Адаптивные аэроstaticеские опоры в шпиндельных узлах станков: дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Красноярск: 1987. – 236 с.

119. Дьячков, А.К. Расчет давлений, возникающих в слое смазки подушек упорного подшипника при заданной форме его тангенсального сечения // В сб.: Развитие гидродинамической теории смазки. – М.: Наука, 1970, – С. 5–27

120. Брагин, А.Н. Влияние погрешности втулки на динамические характеристики опорных газовых подшипников с внешним наддувом // Вестник машиностроения. – 1978. – № 7. – С.16–21.

121. Кушаков, В.И. Расчет деформации отверстия втулки скольжения при степенном упрочнении её материала / В.И. Кушаков, Г.Я. Андреев, Г.Д. Пархомовский // Машиноведение. – 1979. – № 2. – С. 119–126.

122. Белоусов, А.И. Влияние некоторых погрешностей формы вала и обоймы на характеристики гидростатического подшипника / А.И. Белоусов, Т.А. Хромова // В кн. «Исследование гидростатических подшипников». М.: Машиностроение, 1973. – С. 18–28.

123. Кащневский, Л.Я. Влияние некруглости шпинделя и отверстия гидростатического подшипника на радиальное биение оси шпинделя // Станки и инструмент. – 1980. – № 12. – С. 27–28.

124. ГОСТ 4.37-90 Система показателей качества продукции. Гидроприводы объемные, пневмоприводы и смазочные системы. Номенклатура показателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294824/4294824160.pdf>

125. ГОСТ 4.447-86 СПКП. Приборы контрольно-измерительные оптико-механические для измерения линейных размеров. Номенклатура показателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294824/4294824101.pdf>

126. ГОСТ Р 55614-2013 «Контроль неразрушающий. Толщиномеры ультразвуковые. Общие технические требования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293773/4293773709.pdf>

127. ГОСТ ИСО 12301-95 Подшипники скольжения. Методы контроля геометрических показателей и показателей качества материалов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294820/4294820501.pdf>

128. Бражкин, Б.С. Координатно-измерительные машины для контроля тел вращения / Б.С. Бражкин, Н.И. Исаев, А.А. Кудинов, В.С. Миротворский. – М.: Миттель Пресс, 2012. – 207 с.

129. Пошехонов Р.Л., Гуськов А.М. Влияние неоднородности проницаемости ограничителей наддува на характеристики плоских аэростатических опор // Наука и образование. Электронный научно-технический журнал. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 8. – С. 413–439.

130. Винокуров, В.Н. Погрешность метода сплайнов при расчете газостатического цилиндрического подшипника с пористым дросселем // Интернет-журнал «Наукоедение». – 2017. – Т.9. – № 6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/161TVN617.pdf>

131. Пошехонов Р. А. Расчет сферических аэростатических опор при заданном смещении и скорости шпинделя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 10. – С.35–62.

132. Космынин, А.В. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов: монография / А.В. Космынин, С.П. Чернобай, В.С. Виноградов, Ю.Г. Кабалдин – М.: Академия естествознания, 2006. – 218 с.

133. Космынин А.В., Шаломов В.И. Пористые ограничители расхода газостатических подшипников // Современные проблемы науки и образования. – 2006. – № 3. – С. 70–73.

134. Коднянко, В.А. Исследование газостатических опор с двойным дросселированием и активной компенсацией расхода газа: дисс. ... канд. техн. наук. Москва: ИМАШ. 1983. – 201 с.

135. Коднянко, В.А. Исследование газостатических опор с двойным дросселированием газа / В.А. Коднянко, Ю.А. Пикалов, А.С. Тюриков, С.Н. Шатохин // Сб. «Опоры скольжения с внешним источником давления». Красноярск, 1977. – Выпуск 2. – С. 115–118.

136. Коднянко В.А., Шатохин С.Н. Исследование динамики газостатической опоры с двойным дросселированием газа в магистрали нагнетания // Машиноведение. – 1978. – № 6. – С. 21–23.

137. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1973. – 228 с.

138. Волков Е.А. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 248 с.

139. ГОСТ 14140-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски расположения осей отверстий для крепежных деталей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294837/4294837279.pdf>

140. ГОСТ 24643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/395/39589.pdf>

141. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294847/4294847701.pdf>

142. Вибростенды электродинамические одноосевые Dongling Technologies (КНР). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kipltd.su/pdf/dongling_vibrostands_1axis.pdf_0.pdf

143. Горизонтальный стол фирмы ECON. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.econ-group.com/ru/productshow24.html>

144. 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.

145. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле. – М.: Машгиз, 1962. – 96 с.

146. Шатохин, С.Н. К расчету гидростатических опор с учетом зависимости вязкости смазки от давления и температуры // Сб.: Повышение точности и производительности обработки на станках, Красноярск. – 1973. – С. 130–137.

147. Шатохин С.Н., Секацкий В.С. Влияние пульсации давления масла в гидростатических шпиндельных опорах станка на точность обработки // Станки и инструмент. – 1985. – № 12. – С. 9.

148. ГОСТ 30893.2–2002 (ИСО 2768-2–89) Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Допуски формы и расположения поверхностей, не указанные индивидуально. Минск, 2003. III, 7 с.

149. ГОСТ 25346–2013 (ISO 286-1:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. М., 2019. III, 35 с.

150. Герасимов, А.Д. Влияние погрешности монтажа на нагрузочные характеристики червячно-реечных передач с гидростатической смазкой / А.Д. Герасимов, А.Д. Артюхов // Станки и инструмент. – 1978. – № 3. – С. 14 – 16.

151. Шульга, А.К. Влияние перекоса несущих поверхностей прямоугольных гидростатических опор на их расходные и нагрузочные характеристики // Сб.: Гидравлические системы металлорежущих станков, Москва. – 1979. – Вып. 4 – С. 161–168.

152. Пасынков, Р.М. Расчет несущей способности гидростатического подпятника с наклонными поверхностями скольжения // Сб.: Механика машин, М.: Наука. – 1975. – Вып. 49 – С. 85–89.

153. 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.

154. 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.

155. 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.

156. 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.

157. 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.

158. 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.

159. 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. 254–257.

160. 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

161. 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)

162. Справочник технолога - машиностроителя: в 2-х т. / ред. А. М. Дальский. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение-1. – т. 2. – 2003. – 943с.

163. 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, 2011.

164. ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М., 2013. II, 18 с.

Приложение 1
(обязательное)

**Методика нормирования отклонений геометрических параметров
газостатических опор**



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Р.А. Барышев

«07» _____ 2023 г.

**МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР**

Разработал:

Строк Л.В. (ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный
университет»)

Рассмотрено и рекомендовано к внедрению:

Протокол заседания
№ 5 от 01.02 2023 г.

Заведующий кафедрой

_____ О.А. Григорьева

Содержание

1 Область применения.....	3
2 Нормативные ссылки.....	3
3 Термины и определения.....	4
4 Основные положения.....	5
5 Основные процессы нормирования геометрических отклонений опорных поверхностей газостатических опор.....	6
5.1 Конструкция исследуемой газостатической опоры.....	6
5.2 Выбор параметров дросселей и эксплуатационных характеристик газостатической опоры.....	7
5.3 Выбор отклонений размеров газостатических опор с двойным дросселированием.....	8
5.4 Выбор отклонений расположения опорных поверхностей газостатических опор с двойным дросселированием.....	9
5.5 Выбор отклонений формы опорных поверхностей газостатических опор с двойным дросселированием.....	10
5.6 Выбор шероховатости опорных поверхностей газостатических опор с двойным дросселированием.....	10

1 Область применения

1.1 Настоящий документ «Методика нормирования отклонений геометрических параметров газостатических опор» (далее – методика) устанавливает основные положения и процессы, позволяющие нормировать допуски размеров, допуски формы и расположения и шероховатость опорных поверхностей газостатических опор, используемых в качестве вставок направляющих в подвижных узлах прецизионных средств измерения.

1.2 В качестве вставки направляющих принята газостатическая опора круглой формы с двойным дросселированием в магистрали нагнетания воздуха.

1.3 Данная методика предназначена для нормирования геометрических параметров опоры на стадии выполнения конструкторской документации, на стадии разработки технологических процессов изготовления деталей газостатических опор и их монтажа в направляющие подвижных узлов прецизионных средств измерения.

1.4 При нормировании точности размеров газостатической опоры даны рекомендации на установку допусков на наружный диаметр газостатической опоры, на диаметр расположения дросселирующих отверстий и на диаметр самих дросселирующих отверстий.

1.5 Для подвижной и неподвижной опорных поверхностей газостатических опор даны рекомендации по нормированию точности отклонений формы, расположения и шероховатости опорных поверхностей.

2 Нормативные ссылки

В настоящей методике использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 15528-86 Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения

ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки

ГОСТ 24643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения.

Примечание

При пользовании настоящей методикой целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов на территории государства по соответствующему указателю стандартов и классификаторов, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящей методикой следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил можно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

3 Термины и определения

В настоящей методике применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 газостатический подшипник: Подшипник скольжения, предназначенный для работы в режиме газостатической смазки.

3.2 номинальное давление нагнетания: Давление, при котором воздух подается в опору.

3.3 отклонение: Разность между значением и опорным значением.

Примечание - Для отклонений размеров опорным значением является номинальный размер, а значением - действительный размер.

3.4 **допуск:** Разность между верхним и нижним предельными размерами.

4 Основные положения

4.1 В основу расчета газостатических опор закладываются их эксплуатационные характеристики в зависимости от функциональных параметров. Например, исходя из максимальной массы стола с контролируемой деталью определяется несущая способность газостатических опор в направляющих координатно-измерительной машины. Рассчитываются количество вставок газостатических опор, их размеры, давление нагнетания воздуха, размеры дроселирующих устройств. Все эти параметры должны обеспечить расчетную точность позиционирования подвижной части опоры (в данном случае стола), которая обеспечивается одним из основных параметров газостатической опоры – толщиной несущего слоя воздуха между подвижной и неподвижной опорными поверхностями.

4.2 Все расчеты параметров газостатических опор проводятся по их номинальным характеристикам. Действительные параметры при изготовлении, сборке, эксплуатации отличаются от их номинальных значений. Следовательно, и действительные значения функциональных параметров будут отличаться от их номинальных значений.

4.3 В настоящее время для компенсации погрешностей изготовления используют один из способов неполной взаимозаменяемости – метод селективной сборки (метод сортировки). После изготовления все вкладыши газостатических опор подвергают испытаниям, а сборку направляющих осуществляют по близким характеристикам. Такой способ взаимозаменяемости оправдан при изготовлении подшипников качения и довольно затратен для

газостатических направляющих прецизионных средств измерения.

4.4 Данная методика нормирования допусков размеров, формы, расположения и шероховатости поверхностей позволит при проектировании газостатических опор обеспечить основополагающий принцип – принцип полной взаимозаменяемости.

5 Основные процессы нормирования геометрических отклонений опорных поверхностей газостатических опор

5.1 Конструкция исследуемой газостатической опоры

Общий вид газостатической опоры с двойным дросселированием расхода воздуха в магистрали нагнетания представлен на рис. 1. Такой тип газостатических опор обеспечивает высокую степень устойчивости за счет последовательного расположения основного дросселирующего сопротивления (простая диафрагма диаметром d_p), и дополнительных дросселирующих сопротивлений диаметром d_k (кольцевая диафрагма) на входе в несущий слой h . Кольцевая диафрагма предназначена для распределения воздуха по площади несущего слоя и выполняет функцию демпфера вибраций. Дополнительные дросселирующие сопротивления диаметром d_k кольцевой диафрагмы диаметром d_k выполнены по радиусу r_1 .

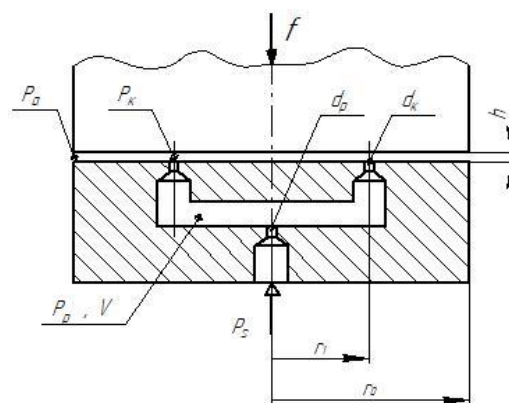


Рис. 1 – Газостатическая опора с двойным дросселированием воздуха

5.2 Выбор параметров дросселей и эксплуатационных характеристик газостатической опоры

5.2.1 Расходные и нагрузочные характеристики газостатической опоры с двойным дросселированием, при заданных габаритном размере r_0 – наружном радиусе опоры и давлении наддува p_s , в значительной степени будут определяться параметрами дросселей: диаметром простой диафрагмы d_p ; диаметрами отверстий кольцевой диафрагмы d_k ; радиусом r_1 расположения отверстий кольцевой диафрагмы.

5.2.2 Рекомендации по выбору основных параметров газостатической опоры с двойным дросселированием приведены соотношения радиуса r_1 расположения отверстий кольцевой диафрагмы к наружному радиусу r_0 опоры равному 0,5.

5.2.3 По графикам, приведенным на рис. 2, выбираем номинальные значения давления наддува p_s и толщины несущего слоя h в зависимости от необходимой (заданной) внешней нагрузки f . Например, для обеспечения внешней нагрузки $f = 80$ Н необходимо обеспечить давление наддува $p_s = 0,3$ МПа. Толщина несущего слоя составит $h = 20$ мкм.

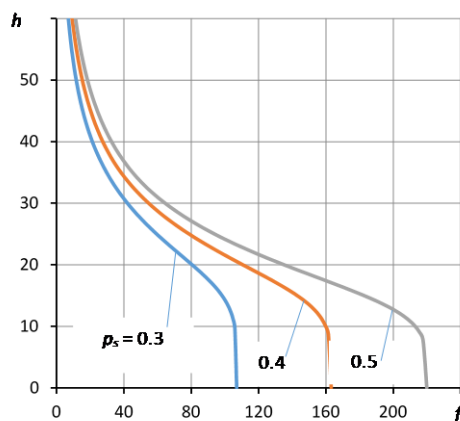


Рис. 2 – Зависимости толщины несущего слоя h (мкм) от внешней нагрузки f (Н) при различных значениях давления наддува p_s (МПа)

5.2.4 Для обеспечения выбранных параметров газостатической опоры по графикам, приведенным на рис. 3, выбираем диаметр отверстия простой диафрагмы d_p . Для расчетных параметров диаметр дросселирующих сопл должен соответствовать $d_p = 0,6$ мм.

5.2.5 Рассчитываем диаметрами отверстий кольцевой диафрагмы $d_k = 1,5 \cdot d_d^2 / h$.

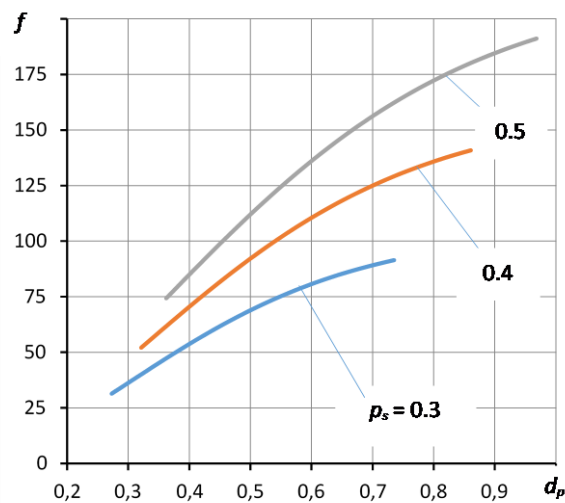


Рис. 3 – Зависимости внешней нагрузки f (Н) от диаметра дросселирующего сопла d_p (мм) при различных значениях давления нагнетания p_s (МПа)

5.3 Выбор отклонений размеров газостатических опор с двойным дросселированием

5.3.1 Выбор отклонений размеров наружного диаметра газостатической опоры. Наружный диаметр опоры относится к свободным (несопрягаемым) размерам. На рабочих чертежах указывается номинальный диаметр и его предельные отклонения, которые нормируются по 12 – 16 квалитетам точности по ГОСТ 25346-2013.

Нормирование наружного диаметра в пределах допуска по 12 квалитету повлечет за собой измерение зазора в пределах 1 % от номинального значения,

по 14 качеству – от 3 до 4 %, а нормирование наружного диаметра по 16 качеству – от 6 до 8 %. При номинальной величине зазора в 20 мкм 8 % в отклонении наружного диаметра изменит точность позиционирования подвижной части, например, координатно-измерительной машины на 1,6 мкм, что недопустимо для прецизионного измерительного оборудования.

Наиболее приемлемым является 14 квалитет точности, который относится к среднему условному классу точности, широко используется в машиностроении и приборостроении для нормирования точности свободных размеров. В сравнении с 16 квалитетом точности 14 квалитет позволит в два и более раз повысит точность позиционирования подвижной части опоры без существенного увеличения стоимости изготовления в связи с отсутствием необходимости использования при изготовлении опоры технологического оборудования повышенной точности.

5.3.2 Выбор отклонений размеров радиуса расположения осей отверстий кольцевой диафрагмы газостатической опоры.

При проектировании газостатической опоры допуски на диаметр расположения осей питательных отверстий необходимо назначать по 14 квалитету.

5.3.3 Выбор отклонений диаметров отверстий кольцевой диафрагмы газостатической опоры. 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.

5.4 Выбор отклонений расположения опорных поверхностей газостатических опор с двойным дросселированием

5.4.1 Неравномерность распределения давления газа по диаметру расположения дросселирующих отверстий вызывает снижение несущей

способности, вызванной отклонением от параллельности опорных поверхностей. Анализ результатов расчетов показал, 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 в исследуемом диапазоне.

5.4.2 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.

5.5 Выбор отклонений формы опорных поверхностей газостатических опор с двойным дросселированием

5.5.1 При проектировании газостатических опор следует учитывать, что отклонения формы несущих поверхностей, соответствующие 20 % от номинального значения толщины несущего слоя могут приводить к измерению несущей способности до 20 % от расчетного значения как в сторону снижения, так и в сторону увеличения.

5.5.2 Допуск формы опорных поверхностей рекомендуется устанавливать в соответствие с 3 – 5 степенью точности по ГОСТ 24643-81.

5.6 Выбор шероховатости опорных поверхностей газостатических опор с двойным дросселированием

При проектировании опор необходимо назначать шероховатость опорных поверхности газостатической опоры с двойным дросселированием по критерию R_a 0,32 мкм и меньше.

Приложение 2
(обязательное)

**Методика нормирования отклонений геометрических параметров
гидростатических опор**



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»
Р.А. Барышев
«*Р.А. Барышев*» 2023 г.

**МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР**

Разработал:

Строк Л.В. (ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный
университет»)

Рассмотрено и рекомендовано к внедрению:

Протокол заседания
№ 5 от 04.02 2023 г.

Заведующий кафедрой

О.А. Григорьева
О.А. Григорьева

Содержание

1 Область применения.....	3
2 Нормативные ссылки.....	3
3 Термины и определения.....	4
4 Основные положения.....	5
5 Основные процессы нормирования геометрических отклонений опорных поверхностей гидростатических опор.....	6
5.1 Конструкция исследуемой гидростатической опоры.....	6
5.2 Выбор отклонений размеров гидростатических опор с дросселем постоянного сопротивления.....	7
5.3 Выбор отклонений расположения опорных поверхностей гидростатических опор с дросселем постоянного сопротивления	8
5.4 Выбор шероховатости опорных поверхностей гидростатических опор с дросселем постоянного сопротивления	9

1 Область применения

1.1 Настоящий документ «Методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор» (далее – методика) устанавливает основные положения и процессы, позволяющие нормировать допуски размеров, допуски формы и расположения и шероховатость опорных поверхностей гидростатических опор, используемых в качестве самостоятельных опор или как один из элементов направляющих в подвижных узлах испытательного оборудования.

1.2 В качестве опоры принята незамкнутая гидростатическая опора с центральной рабочей камерой круглой формы с пассивной компенсацией расхода смазки (с дросселям постоянного сопротивления).

1.3 Данная методика предназначена для нормирования геометрических параметров опоры на стадии выполнения конструкторской документации, на стадии разработки технологических процессов изготовления деталей гидростатических опор и их монтажа в направляющие подвижных узлов испытательного оборудования.

1.4 При нормировании точности размеров гидростатической опоры даны рекомендации на установку допусков на наружный и внутренний диаметры гидростатической опоры.

1.5 Для подвижной и неподвижной опорных поверхностей гидростатических опор даны рекомендации по нормированию точности отклонений расположения и шероховатости опорных поверхностей.

2 Нормативные ссылки

В настоящей методике использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 15528-86 Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения

ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

ГОСТ ИСО 4378-4-2001 Подшипники скольжения. Термины, определения и классификация. Часть 4. Расчетные параметры и их обозначения

ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки

ГОСТ 24643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения.

Примечание

При пользовании настоящей методикой целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов на территории государства по соответствующему указателю стандартов и классификаторов, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящей методикой следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил можно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

3 Термины и определения

В настоящей методике применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **гидростатический подшипник:** Подшипник скольжения, предназначенный для работы в режиме гидростатической смазки.

3.2 номинальное давление нагнетания: Давление, при котором смазочный материал подается в подшипник.

3.3 расход смазочного материала: Объем смазочного материала, проходящего через подшипник в единицу времени

3.4 отклонение: Разность между значением и опорным значением.

Примечание - Для отклонений размеров опорным значением является номинальный размер, а значением - действительный размер.

3.5 допуск: Разность между верхним и нижним предельными размерами.

4 Основные положения

4.1 В основу расчета гидростатических опор закладываются их эксплуатационные характеристики в зависимости от функциональных параметров. Например, исходя из максимальной массы стола с контролируемой деталью определяется несущая способность гидростатических опор в направляющих испытательного оборудования. Рассчитываются количество вставок гидростатических опор, их размеры, давление нагнетания смазки, размеры дросселирующих устройств. Все эти параметры должны обеспечить расчетную точность позиционирования подвижной части опоры (в данном случае стола), которая обеспечивается одним из основных параметров гидростатической опоры – толщиной несущего слоя смазки между подвижной и неподвижной опорными поверхностями.

4.2 Все расчеты параметров гидростатических опор проводятся по их номинальным характеристикам. Действительные параметры при изготовлении, сборке, эксплуатации отличаются от их номинальных значений. Следовательно, и действительные значения функциональных параметров будут отличаться от их номинальных значений.

4.3 Данная методика позволит при проектировании гидростатических опор обоснованно назначать допуски размеров, расположения и шероховатость опорных поверхностей гидростатических опор.

5 Основные процессы нормирования геометрических отклонений опорных поверхностей гидростатических опор

5.1 Конструкция исследуемой гидростатической опоры

Общий вид незамкнутой гидростатической опоры с пассивной компенсацией расхода смазки (с дросселем постоянного сопротивления) с центральной рабочей камерой представлен на рис. 1. Такой тип может использоваться в качестве самостоятельной опоры или как один из элементов направляющих. В одном оборудовании устанавливают восемь и более вкладышей, которые для обеспечения равновесного состояния должны обладать одинаковыми техническими и эксплуатационными характеристиками.

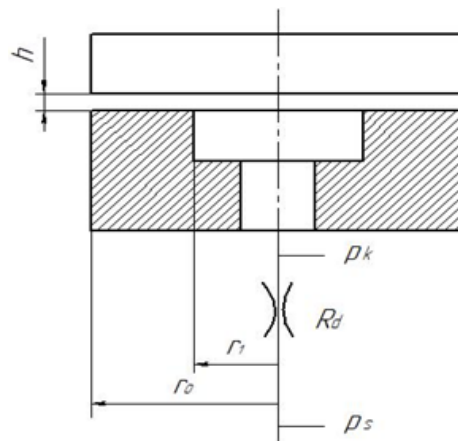


Рис. 1 – Незамкнутая гидростатическая опора:

h – толщина несущего слоя смазки; r_0 – наружный радиус опоры; r_1 – внутренний радиус опоры; p_k – давление в рабочей камере подшипника; p_s – номинальное давление смазки в магистрали нагнетания

5.2 Выбор отклонений размеров гидростатических опор с дросселем постоянного сопротивления

5.2.1 Выбор отклонений размеров наружного диаметра гидростатической опоры. Наружный диаметр опоры относится к свободным (несопрягаемым) размерам. На рабочих чертежах указывается номинальный диаметр и его предельные отклонения, которые нормируются по 12 – 16 квалитетам точности по ГОСТ 25346-2013.

Нормирование наружного диаметра в пределах допуска по 12 квалитету повлечет за собой измерение толщины несущего слоя смазки в пределах 2 % от номинального значения, по 14 квалитету – 5 %, а нормирование наружного диаметра по 16 квалитету – 8 %. Ужесточение точности изготовления наружного радиуса ниже 12 квалитета нецелесообразно. Окончательное решение принимает проектировщик в зависимости от требуемой точности к соблюдению постоянства толщины несущего слоя смазки.

5.2.2 Выбор отклонений размеров внутреннего радиуса гидростатической опоры. При проектировании гидростатической опоры допуски на внутренний диаметр не следует ужесточать свыше 12 – 14 квалитетов, как и для большинства свободных размеров.

Оптимальный безразмерный внутренний радиус гидростатической опоры зависит только от значения безразмерного давления в кармане. 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 (см. рис. 2).

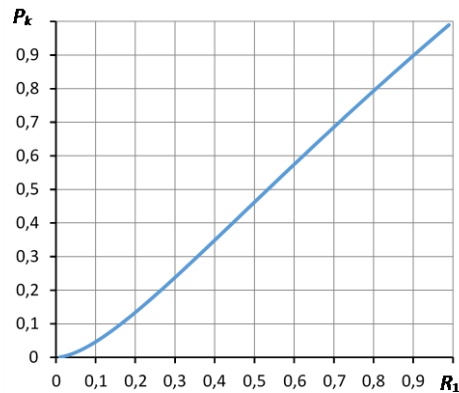


Рис.2 – График зависимости $P_k(R_1)$

5.3 Выбор отклонений расположения опорных поверхностей гидростатических опор с дросселем постоянного сопротивления

5.3.1 Неравномерность распределения давления смазки вызывает снижение несущей способности, вызванной отклонением от параллельности опорных поверхностей. 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.

5.3.2 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 24643-81.

5.4 Выбор шероховатости опорных поверхностей гидростатических опор с дросселем постоянного сопротивления

5.4.1 При выборе значения шероховатости опорных поверхностей можно пользоваться зависимостями, приведенными на рис. 3. На данном рисунке приведены зависимости несущей способности и расхода смазки, выраженные в безразмерной форме, от величины параметра Rz по ГОСТ 2789–73.

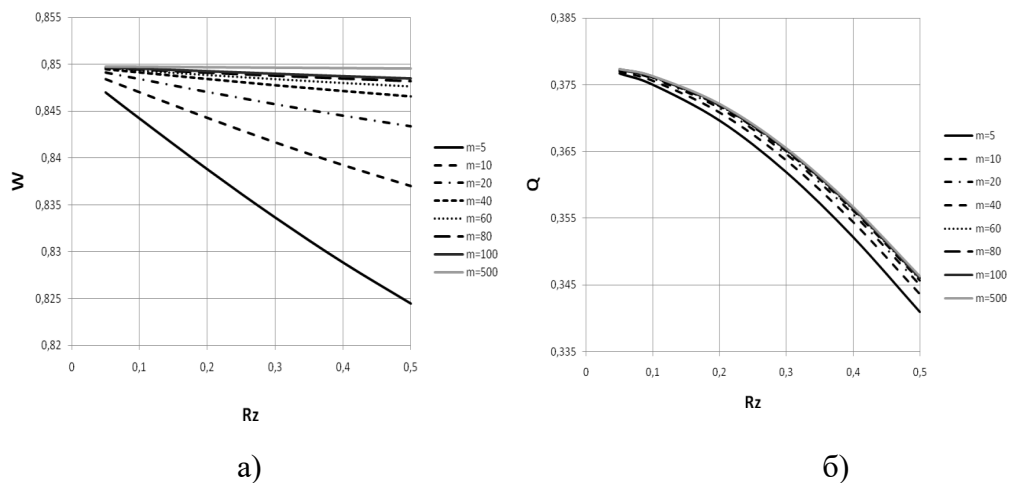


Рис. 3 – Влияние шероховатости поверхности на:

а – несущую способность; б – расход смазки

При увеличении шероховатости происходит незначительное уменьшение несущей способности (0,1 – 0,3 %) и существенное уменьшение расхода смазки.

5.4.2 Пример пользования графическими зависимостями. При переходе к размерным параметрам получим, что в гидростатическом подшипнике с номинальными параметрами $r_0=36$ мм, $r_1=18$ мм, $h_0=20$ мкм, $P_s=2$ МПа, $\mu=0,005$ Па·с изменение шероховатости в пределах от 0,05 до 0,4 приведет к изменению расхода смазки на $0,069 \cdot 10^{-6}$ л/мин (5,7%).

5.4.3 При проектировании опор необходимо назначать шероховатость опорных поверхности по критерию Rz 0,4 мкм и меньше.

Приложение 3 (обязательное)

Акт внедрения в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Д.С. Гуц

«10» сентября 2022 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**в учебный процесс Политехнического института ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет» результатов диссертационной
работы Строк Л.В. на тему «Совершенствование методов расчета
газостатических и гидростатических опор прецизионных средств
контроля размеров и испытательного оборудования»**

Результаты результатов диссертационной работы Строк Л.В. внедрены в учебный процесс Политехнического института Сибирского федерального университета на кафедре «Стандартизация, метрология и управление качеством» и используется при проведении занятий по дисциплинам:

«Стандартизация» при выполнении практических занятий и курсовой работы при разработке разделов, связанных с разработкой проектов национальных стандартов;

«Основы испытаний продукции», при разработке методик испытаний.

Основы методического и научного уровня, приведенные в диссертационной работе, позволят повысить уровень подготовки бакалавров по направлениям подготовки «Стандартизация и метрология» и «Управление качеством».

Заведующий кафедрой
«Стандартизация, метрология и
управление качеством», к.т.н.

Григорьева О.А.

Приложение 4
(обязательное)

**Акт внедрения в ФБУ «Государственный региональный Центр
стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике
Хакасия и Республике Тыва»**

УТВЕРЖДАЮ

И. о. директора ФБУ «Государственный
региональный Центр стандартизации,
метрологии и испытаний в
Красноярском крае, Республике Хакасия
и Республике Тыва»

В.Ф. Гарифуллин
«февраль» 2023 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Совершенствование методов расчета газостатических и гидростатических опор прецизионных средств контроля размеров и испытательного оборудования», выполненной Строк Лилией Владимировной на кафедре «Стандартизация, метрология и управление качеством» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», внедрены в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва».

1. Вид внедрения результатов: «Методика нормирования отклонений геометрических параметров гидростатических опор».

2. Характеристика масштаба внедрения: рекомендации по нормированию точности геометрических показателей качества гидростатических опор использовались при проектировании испытательного оборудования.

3. Форма внедрения – методика.

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ – качественно новые.

(пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)

Главный метролог


Самонин А.В.