М 412 273

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

НА ЛСН НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

ПРИХОДЬКО Олег Борисович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОР ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ МАШИН

Специальность 05.02.02 – Машиноведение
и детали машин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 1983 г.

Работа выполнена в Краматорском научно-исследовательском и проектно-технологическом институте машиностроения (НИИПТмаш, г. Краматорск).

Официальные оппоненты – Заслуженный деятель науки и техники УССР, доктор технических наук, профессор Артеменко Н.П.

Доктор технических наук, профессор Иванов М.Н.

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор физико-математических наук, профессор Слезкин Н.А.

Ведущее предприятие – Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургического машиностроения.

Защита диссертации со
на заседании специализиро
в Московском ордена Ленина
ордена Трудового Красного
имени Н.Э.Баумана по адре
ул., д.5.

С диссертацией можно
имени Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан

Ученый секретарь Совета
доктор технических наук

Л-88061 от II.II.83 г. О

Типографи

М412273

Актуальность темы. Решениями XXУ и XXУI съездов КПСС перед отечественным машиностроением поставлены задачи существенного повышения качества выпускаемой продукции. Одним из важнейших показателей качества машин, механизмов и агрегатов является их надежность и долговечность. Эти вопросы особенно актуальны для тяжелого машиностроения, так как от качества выпускаемой им продукции во многом зависит качество продукции, выпускаемой другими отраслями народного хозяйства, где эти машины и механизмы находятся в эксплуатации.

Вопросы длительной эксплуатации техники являются делом государственной политики, поскольку от этого зависит эффективность производства, народнохозяйственные пропорции и структура капиталовложений.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является повышение долговечности и надежности узлов, поверхности деталей которых находятся в относительном движении и взаимно передают нагрузки. Замена граничного трения жидкостным значительно увеличивает срок эксплуатации таких сопряжений, исключает практически их износ, уменьшает нагрузки, действующие на соответствующие передачи и приводы, обусловливает снижение энергетических потерь, увеличивает общий к.п.д. всей машины. Важность решаемых в этой связи вопросов очевидна не только при создании новой техники, а и при модернизации находящейся в эксплуатации, особенно уникальной, тяжелой, определяющей ритм и объемы производства.

Поэтому создание опор, работающих в жидкостном режиме трения, и является проблемой, требующей своего решения при их проектировании, расчете и исследованиях. При этом тема настоящей диссертации вытекает из проводимых в Краматорском научно-исследовательском и проектно-технологическом институте машиностроения (НИИПТмаш) плановых научно-исследовательских работ, в основу которых положены те проблемы и задачи, которые в силу малой их изученности и разработанности или из-за низкой эксплуатационной надежности, долговечности и работоспособности существующих технических решений были поставлены промышленными предприятиями тяжелого машиностроения, и выполняемых в рамках Программы исследований на 1971-1990 г г. "Научные проблемы повышения надежности и долговечности конструкций и механизмов", разработанной в соответствии с Постановлением Президиума АН

МГИ2073

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1412273
Приходько О.Б.Разработка

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

СССР от 26.06.1973 г. № 581.

Необходимость проведения работ в этом направлении подчеркнута и в Постановлении Госкомитета по науке и технике при Совете Министров СССР от 12.12.1980 г. № 473/249 "Основные направления работ по фундаментальным и прикладным исследованиям в области трения, смазки и износа" на 1981-1986 г г., а также в Программе исследований по проблеме "Гидромеханика", ч. III, "Гидродинамическая теория смазки", утвержденной Постановлением Президиума АН УССР от 23.06.1975 г., соисполнителем которой являлся НИИПТмаш (г. Краматорск).

В основных направлениях научных исследований на 1981 - - 1985 г г., разработанных научным советом АН СССР по трению и смазкам, тоже говорится о необходимости продолжения разработки теории гидродинамической смазки с учетом тепловых процессов для опор конечной длины.

Повышению долговечности и сохранению проектной точности при длительной эксплуатации машин и механизмов особое внимание уделено и в координационном плане АН СССР на 1981-1985 г г. по проблеме "Трение и износостойкость твердых тел", утвержденном 24.09.1981 г., шифр 1.11.3.2,б, соисполнителем которого является НИИПТмаш (г. Краматорск).

Цель и задачи работы. Теоретическое и экспериментальное исследование, а также разработка новых конструктивных решений узлов подвижных сопряжений тяжелых машин и механизмов, обеспечивающих безусловное разделение поверхностей деталей, находящихся в относительном движении и взаимнопередающих или воспринимающих нагрузки, гарантированным слоем смазывающего вещества в процесс всей эксплуатации, с целью увеличения надежности и технологических возможностей, увеличения межремонтных сроков и снижения трудоемкости изготовления.

В связи с этим, для общности рассуждений и разработки единого алгоритма реализации исходных уравнений независимо от геометрических параметров рассматриваемых сопрягаемых поверхностей согласно накопленному на сегодняшний день опыту, необходимо:

- проанализировать основные дифференциальные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости, записанные в ортогональной криволинейной системе координат, и на основании полученных зависимостей представить уравнения распределения давлений и

температур в исследуемой области в этой же системе координат (как общий случай);

- усовершенствовать математические модели неизотермического течения смазывающего вещества в областях конечных размеров и в областях с источниками;
- интерпретировать и реализовать для задач гидродинамической теории смазки наиболее эффективные и хорошо себя зарекомендовавшие методы решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка с соответствующими граничными условиями;
- провести параметрические исследования опор жидкостного трения с оптимизацией их эксплуатационных параметров в зависимости от требований, предъявляемых к рассматриваемому узлу, машине, механизму;
- сопоставить результаты, полученные теоретически и экспериментально на стендах в лабораторных условиях и на действующем оборудовании в условиях эксплуатации, с данными других авторов и на основании их анализа разработать научно-обоснованные рекомендации по расчету и проектированию некоторых типов и видов опор жидкостного трения тяжелых машин, в основном с сопрягаемыми поверхностями равной кривизны.

Научная новизна. Теоретическое обобщение накопленного наукой опыта в области исследований и расчетов опор жидкостного трения с корректировкой ряда положений, возникших в связи с появлением нового вида опор, в которых используется как гидродинамический, так и гидростатический эффекты, а также с обнаружением новых явлений, зафиксированных при опытах, проводимых непосредственно автором и другими исследователями.

Для чего:

- на основании анализа исходных уравнений механики сплошных сред – исходных дифференциальных уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости, записанных в криволинейной ортогональной системе координат и приведенных к компонентам вектора скорости, установлены связи и закономерности течения смазывающего вещества в зазоре между сопрягаемыми поверхностями произвольной формы. Это позволило после осреднения скоростей по толщине слоя смазывающего вещества в предположении ламинарности и неизотермичности течения представить уравнения, описывающие закон распределения давлений и тем-

пературы в исследуемой области, в двумерной постановке также в ортогональной криволинейной системе координат (как общий случай);

- в результате анализа закономерностей течения смазывающего вещества в пограничных слоях и его термического состояния предложена корректировка граничных условий при численной реализации уравнения притока тепла;
- разработаны и реализованы математические модели неизотермического течения смазывающего вещества и течения в областях с источниками, что имеет смысл и при решении других задач теории поля;
- интерпретированы и реализованы применительно к решению исходных уравнений гидродинамической теории смазки в двумерной постановке метод электролитического моделирования и численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка – метод конечных разностей и метод конечных элементов, что позволяет при исследованиях и расчетах опор жидкостного трения широко использовать ЭЦВМ;
- разработаны и реализованы методики экспериментальных исследований с использованием прогрессивных методов измерений параметров слоя смазывающего вещества, например, с непрерывной записью эпюр давлений и зазоров в соответствующих сечениях рассматриваемой области, позволяющие производить стендовые и натурные испытания опор жидкостного трения как в лабораторных условиях, так и непосредственно на производстве в условиях эксплуатации;
- предложена общая методика количественного определения основных эксплуатационных параметров опор, позволяющая прогнозировать необходимость стимуляции соответствующих параметров для достижения безусловно жидкостного режима трения с выполнением наперед заданных требований, предъявляемым к рассматриваемому узлу.

Практическая ценность работы. Разработанный автором на основании аппроксимации исходных уравнений согласно схеме центральной пятиточечной звезды алгоритм определения полей давлений и температур в рассматриваемых областях широко уже на протяжении 10–15 лет используется в расчетной практике другими исследователями.

На основании результатов теоретических и эксперименталь-

ных исследований разработаны инженерные методики расчетов и проектирования опор жидкостного трения, преимущественно с сопрягаемыми поверхностями равной кривизны, позволяющие производить выбор геометрических соотношений и рассчитывать их системы питания, оптимизируя соответствующие параметры в зависимости от условий эксплуатации и технических требований, предъявляемых к рассматриваемой машине или механизму, пользуясь которыми конструктор или расчетчик может, не вдаваясь в сложные теоретические выкладки, сознательно экстремировать те или иные явления, имеющие место в слое или потоке смазывающего вещества.

С целью практической реализации результатов, полученных в процессе исследований и их внедрения в конкретные узлы подвижных сопряжений машин согласно планов НИР НИИПТмаш, утвержденных МИНТЯЖмашем, выполнено 24 научно-исследовательские работы. Новые оригинальные конструктивные решения узлов машин, в которых применяются опоры жидкостного трения, защищены 20 авторскими свидетельствами на изобретения.

Натурные экспериментальные исследования опор жидкостного трения, проведенные в условиях эксплуатации, согласно разработанным методам, позволили получить информацию, нужную конструкторам и расчетчикам, не только по узлам, поверхности деталей которых находятся в относительном движении или состоянии покоя, передают или воспринимают нагрузку, а и о параметрах других узлов или всей машины в целом. Так, например, испытания гидростатодинамических двукамерных опор барабана опытной рудоразмольной мельницы ММС 90х30, проведенные на Ингулецком горно-обогатительном комбинате (г.Кривой Рог), позволили установить распределение нагрузок, действующих на переднюю и заднюю опоры, а также определить направление и величину главного вектора сил, действующих на барабан с породой. Полученная информация использована при отработке серийного варианта мельницы.

Натурные испытания узлов жидкостного трения, в основном внедренных по разработкам и рекомендациям автора, в производственных условиях при эксплуатации машин, механизмов и агрегатов произведены на Ново-Краматорском машиностроительном заводе им. В.И.Ленина, Лебединском горнообогатительном комбинате Курской магнитной аномалии, Головной ГЭС Вахшского каскада гидроэлектростанции, Донецком металлургическом заводе им. В.И.Ленина, Харьковском турбинном заводе им. С.М.Кирова, Краматорском заводе тяжелого станкостроения им. В.Я.Чубаря, Славянской ГРЭС

и других предприятиях страны.

Практическая и научная ценность работы подтверждается и решением Всесоюзной научной конференции "Трение и износ в машинах", проведенной МВ и ССО СССР, АН СССР, научным советом АН СССР по трению и смазке, а также др. организациями в 1979 году в г.Челябинске, в котором, в частности, говорится: "... за последние годы наблюдается усиление работ по развитию теории и расчетов опор скольжения, работающих в режиме гидродинамического трения. Достигнуты успехи в решении задач гидродинамической теории смазки, связанных с теорией опор конечной длины с источниками смазки. Разработаны численные методы расчета, применяемые при проектировании гидродинамических и гидростатодинамических опор со сложной конфигурацией смазочного слоя. Получили дальнейшее развитие экспериментальные методы. К числу важнейших прикладных проблем гидродинамической теории смазки относятся работы по оптимизации рабочих параметров опор скольжения и автоматизации проектирования".

Реализация результатов работы. На основании результатов исследований, проведенных в рассматриваемой работе, разработан ряд узлов подвижных сопряжений тяжелых машин, работающих безусловно в жидкостном режиме трения, которые внедрены и успешно эксплуатируются на Ново-Краматорском машиностроительном заводе им. В.И.Ленина; Краматорском заводе тяжелого станкостроения им. В.Я.Чубаря; Сызранском заводе тяжелого машиностроения (ныне Сызранский турбинный завод); Харьковском турбинном заводе им. С.М.Кирова; Славянской ГРЭС; Ждановском заводе тяжелого машиностроения им. 50-летия Октябрьской социалистической революции; Ингулецком, Лебединском горнообогатительных комбинатах; комбинатах Алданзолото и Якуталмаз, а также на других предприятиях страны и за рубежом.

Экономический эффект от внедрения результатов работы составляет два млн. руб. в год. Двусторонние акты внедрений прилагаются к диссертации.

К тому же более чем 35 предприятиям страны по их запросам переданы материалы и рекомендации по проектированию и эксплуатации различных узлов жидкостного трения. В том числе результаты некоторых исследований переданы Харьковскому заводу тяжелых электрических машин им. В.И.Ленина, Уральскому заводу тяжелого машиностроения им. С.Орджоникидзе, Бузулукскому заводу тяжелого машиностроения, Отделу комплексных проблем машино-

строения УНЦ АН СССР (г.Свердловск) и др.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на 32 научных, научно-технических Всесоюзных и Республиканских конференциях, симпозиумах, семинарах и совещаниях, а также на тематических научно-технических конференциях вузов страны в Москве, Ленинграде, Киеве, Минске, Харькове, Челябинске, Куйбышеве и др. В том числе на:

- Всесоюзной научно-технической конференции "Ремонт и модернизация технологического оборудования в условиях научно-технического прогресса", г.Саратов, II-I3 ноября I975 г.

- IУ Всесоюзной конференции, проводимой Государственным комитетом по науке и технике при Совете Министров СССР, АН СССР и АН БССР "Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела АЭС", г. Минск, I-6 июня I975 г.

- XXIX научно-технической конференции Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола. Межфакультетная секция газовой и жидкостной смазки, г.Челябинск, I5-I7 апреля I976 г.

- XI Республиканском семинаре. Секция 4 "Гидроаэродинамика двигателей и машин" научного Совета по проблеме "Гидромеханика" АН УССР, г.Харьков, I977 г.

- У Всесоюзной научно-технической конференции по компрессоростроению, проводимой МВ и ССО СССР, Министерством химического и нефтяного машиностроения, МВТУ им. Н.Э.Баумана "Повышение эффективности и совершенствование компрессорных машин и установок". Секция "Опоры и уплотнения вращающихся валов", г.Москва, I-3 февраля I978 г.

- Всесоюзной научной конференции, проводимой МВ и ССО СССР, АН СССР, научным советом АН СССР по трению и смазке, ЧПИ им.Ленинского комсомола "Трение и износ в машинах". Секция "Гидродинамическое трение в опорах скольжения", г.Челябинск, сентябрь I979 г.

- Всесоюзной научно-технической конференции, проводимой ЦП НТО Машпром СССР, Воронежским Областным правлением НТО Машпром, машиностроительными Министерствами СССР "Технологическое обеспечение ресурса и надежности машин", г.Воронеж, I-3 октября I980 г.

- УI Всесоюзной научно-технической конференции по компрессоростроению, проводимой МВ и ССО СССР, Министерством химического и нефтяного машиностроения, ЛПИ им. М.И.Калинина "По-

вышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок:. Секция "Опоры и уплотнения компрессоров", г.Ленинград, декабрь 1981 г.

- Семинаре "Динамика вязкой несжимаемой жидкости" в МГУ им. М.В.Ломоносова (кафедра гидромеханики), г.Москва, декабрь 1982 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований и внедрений опубликовано 105 работ, получено 20 авторских свидетельств СССР на изобретения и выполнено 24 научно-исследовательские работы, из которых 18 зарегистрировано в системе ВИЦ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа, объемом 626 стр., состоит из введения, 8 разделов, заключения, списка литературы, приложений и содержит 294 страницы машинописного текста, 30 таблиц, 140 рисунков. Список литературы содержит 327 наименований на 36 страницах. Приложения - на 155 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и цель исследований.

1. Основные направления современного развития гидродинамической теории смазки и постановка задачи исследований

Вопросам теоретических и экспериментальных исследований опор жидкостного трения различных видов и типов посвящены многие работы видных советских и зарубежных исследователей. Гидродинамическая теория смазки как наука сформировалась в конце прошлого и начале настоящего веков. Основоположниками науки о смазке явились Н.Петров, О.Рейнольдс, А.Мичел, Н.Зоммерфельд, Н.Жуковский, С.Чаплыгин и др. В наши дни большой вклад в дальнейшее развитие теории, экспериментальных исследований, решения практических задач, связанных с разработкой и внедрением опор жидкостного трения, внесли отечественные и зарубежные ученые Н.П.Артеменко, А.И.Белоусов, А.Г.Бургвиц, А.К. Дьячков, Г.А.Завьялов, А.Камерон, Д.С.Коднир, М.В.Коровчинский, В.А.Максимов, О.Пинкус, М.Е.Подольский, А.Т.Полецкий, Г.А.Поспелов, Г.Риппл, Н.Д.Решетов, Ф.П.Снеговский, Н.А.Слезкин, Б.Стернлихт, Н.Типей, И.А.Тодер, И.Я.Токарь и многие другие.

На основании анализа результатов исследований, проведенных специалистами, а также учитывая более чем двадцатилетний опыт работы автора в области исследований, расчетов, проектирования и внедрения опор жидкостного трения в узлы тяжелых машин и механизмов, сделаны выводы, на основании которых с учетом запросов предприятий тяжелого машиностроения, а также направленности проблематики программ исследований, принятых в соответствии с постановлениями Госкомитета по науке и технике при Совете Министров СССР, АН СССР и АН УССР, сформулированы тема, цель и задачи настоящей работы.

2. Исходные уравнения гидродинамической теории смазки и определение величин, характеризующих основные параметры опор жидкостного трения

В результате безразмерного анализа основных дифференциальных уравнений, описывающих движение вязкой несжимаемой жидкости, записанных в ортогональной криволинейной системе координат и представленных в компонентах вектора скорости, выведены уравнения, описывающие законы распределения давлений и температур в исследуемой области в этой же системе координат. Представленные уравнения выведены в предположении постоянства давления и температуры по толщине слоя смазывающего вещества, ламинарности его течения в исследуемой области и отсутствия теплоотвода (или притока тепла) в сопрягаемые поверхности.

Решение исходных уравнений в областях конечных размеров с источниками получить в общем виде невозможно, так как функция давления является сложной, зависящей от давления в каждом источнике и от гидродинамического эффекта. Предложена математическая модель решения рассматриваемой задачи, полагающая разложения общего решения на сумму решений в областях с соответствующими граничными условиями с последующим суммированием методом суперпозиций с учетом компенсирующих систем (дроссели, насосы, клапаны постоянного расхода, регуляторы расхода смазывающего вещества и т.д.), позволяющих количественно определить параметры имеющихся источников.

Такой подход, конечно, возможен в изотермической постановке задачи, т.е. в том случае, когда искомая функция является линейной. Справедливость сделанного допущения о изотермичности течения смазывающего вещества в областях с источниками подтвержда-

ется экспериментально, по крайней мере, до скоростей 100-120 м/с. В областях, не имеющих источников, т.е. работающих в гидродинамическом режиме, неизотермичность существенна. Особенно большое значение при реализации этих задач имеет температура во входном сечении, которая отличается от температуры подаваемого смазывающего вещества. Представляется, как более близко отвечающее опыту, температуру во входном сечении отыскивать как среднекалориметрическую с учетом количества тепла, переносимого с выходной кромки на входную рассматриваемой области (если область одна) или с предшествующей на рассматриваемую. Последнее вытекает из рассмотрения явлений, происходящих в пограничных слоях.

При исследованиях изучалась возможность использования метода конечных элементов. Однако, не получив больших преимуществ от использования этого метода, было решено в качестве базового принять метод конечных разностей. При реализации систем алгебраических уравнений, апроксимирующих исходные, кроме метода Зейделя, исследована возможность применения методов матричной прогонки, Булеева, переменных направлений и др. Учитывая особые требования к поведению искомой функции на границах исследуемой области, в качестве основного выбран метод Зейделя. При исследованиях гидростатических опор широко использовался также метод электрогидродинамической аналогии и особенно метод электролитического моделирования.

При этом в приведенных ниже уравнениях (I) и (2), апроксимирующих исходные дифференциальные уравнения, описывающие закон распределения давлений в исследуемых областях, возникающих соответственно от гидродинамического и гидростатического эффектов, при рассмотрении задач в изотермической постановке значение динамического коэффициента вязкости принимается постоянным, а уравнение (3), апроксимирующее дифференциальное уравнение тепла, теряет смысл. Причем, алгебраические уравнения, апроксимирующие исходные дифференциальные уравнения, записанные в ортогональной криволинейной системе координат, позволяют численно реализовать задачи гидродинамической теории смазки практически для опор жидкостного трения с любой формы сопрягаемых поверхностей. Для чего необходимо вместо криволинейных координат подставить соответствующие рассматриваемому случаю координаты, а вместо коэффициентов Ляме их значения, которые приведены в табл.I.

Конечно-разностная апроксимация исходных уравнений согласно схеме центральной пятиточечной звезды имеет следующий вид.

Таблица I.I.

Параметры, связывающие ортогональную криволинейную систему координат с другими системами координат, в которых записаны основные зависимости

Параметры	СИСТЕМА КООРДИНАТ			
	Прямоугольная	Полярная	Сферическая	Цилиндрическая
П	L	R	R	R
$\bar{Q}_1$	$\bar{x}$	$\bar{\varphi}$	$\bar{\varphi}$	$\bar{\varphi}$
$\bar{Q}_2$	$\bar{y}$	$\bar{r}$	$\bar{\vartheta}$	$\bar{z}$
H_I	I	$r_0/\beta+\bar{r}$	$\sin\theta\,(\theta_0/\beta+\bar{\vartheta})$	I
H_2	I	I	I	I
H_3	I	I	I	I
А	L	ϕ	ϕ	ϕ
Б	B	R	θ	L
С	I	R	R	R
Д	I	I	R	I
Е		I	I	I
АС/БД	L/B	ϕ	ϕ/θ	$R\phi/L$

Примечание: П – параметр, характеризующий основной размер исследуемой области

$$\bar{P}_{i;k\,дин} = \frac{\left(\left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i+\frac{1}{2};k}\bar{P}_{i+1;k} + \left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i-\frac{1}{2};k}\bar{P}_{i-1;k}\right)H_{02} +}{\left(\left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i+\frac{1}{2};k} + \left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i-\frac{1}{2};k}\right)H_{02}^2 + \left(\frac{AC}{БД}\right)^2\left(\left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k+\frac{1}{2}} + \left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k-\frac{1}{2}}\right)H_{01}^2}$$

$$+\left(\frac{AC}{БД}\right)^2\left(\left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k+\frac{1}{2}}\bar{P}_{i;k+1} + \left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k-\frac{1}{2}}\right)\cdot H_{01}^2 -$$

$$\frac{}{\left(\left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i+\frac{1}{2};k} + \left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i-\frac{1}{2};k}\right)H_{02}^2 + \left(\frac{AC}{БД}\right)^2\left(\left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k+\frac{1}{2}} + \left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k-\frac{1}{2}}\right)H_{01}^2}$$

$$-\left.\bar{H}_1\bar{H}_2\bar{H}_3\right|_{i;k}\left(\frac{\left.\bar{h}\right|_{i+\frac{1}{2};k} - \left.\bar{h}\right|_{i-\frac{1}{2};k}}{H_{01}}\right)H_{01}^2H_{02}^2$$

$$\frac{}{\left(\left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i+\frac{1}{2};k} + \left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i-\frac{1}{2};k}\right)H_{02}^2 + \left(\frac{AC}{БД}\right)^2\left(\left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k+\frac{1}{2}} + \left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k-\frac{1}{2}}\right)H_{01}^2}$$

(I)

$$\bar{P}_{i;k\,cm} = \frac{\left(\left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i+\frac{1}{2};k}\bar{P}_{i+1;k} + \left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i-\frac{1}{2};k}\bar{P}_{i-1;k}\right)H_{02}^2 +}{\left(\left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i+\frac{1}{2};k} + \left.\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\right|_{i-\frac{1}{2};k}\right)H_{02}^2 + \left(\frac{AC}{БД}\right)^2\left(\left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k+\frac{1}{2}} + \left.\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\right|_{i;k-\frac{1}{2}}\right)H_{01}^2}$$

$$+\left(\frac{AC}{БД}\right)^2\cdot\left(\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\Big|_{i;k+\frac{1}{2}}\bar{P}_{i;k+1}+\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\Big|_{i;k-\frac{1}{2}}\bar{P}_{i;k-1}\right)H_{01}^2$$

$$\left(\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\Big|_{i+\frac{1}{2};k}+\frac{\bar{H}_2\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_1\bar{\mu}}\Big|_{i-\frac{1}{2};k}\right)H_{02}^2+\left(\frac{AC}{БД}\right)^2\left(\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\Big|_{i;k+\frac{1}{2}}+\frac{\bar{H}_1\bar{H}_3\bar{h}^3}{\bar{H}_2\bar{\mu}}\Big|_{i;k-\frac{1}{2}}\right)H_{01}^2$$

(2)

$$\bar{T}_{i+1;k}=\frac{\dfrac{\bar{\mu}}{3\bar{H}_3^2\bar{h}^2}\Big|_{i;k}\left\{\bar{H}_1^2\Big|_{i;k}+\dfrac{3\bar{h}^4}{\bar{H}_1^2\bar{\mu}^2}\Big|_{i;k}\left[\left(\dfrac{\bar{P}_{i+1;k}-\bar{P}_{i-1;k}}{2\bar{H}_{01}}\right)^2+\right.\right.}{\left[1-\dfrac{\bar{h}^2}{\bar{\mu}\bar{H}_1^2}\Big|_{i;k}\cdot\left(\dfrac{\bar{P}_{i+1;k}-\bar{P}_{i-1;k}}{2H_{01}}\right)\right]\cdot\dfrac{1}{2H_{01}}}$$

$$\frac{\left.\left.+\left(\dfrac{AC}{БД}\right)^2\cdot\left(\dfrac{\bar{H}_1}{\bar{H}_2}\right)^2\Big|_{i;k}\left(\dfrac{\bar{P}_{i;k+1}-\bar{P}_{i;k-1}}{2H_{02}}\right)^2\right]\right\}+}{\left[1-\dfrac{\bar{h}^2}{\bar{\mu}\bar{H}_1^2}\Big|_{i;k}\left(\dfrac{\bar{P}_{i+1;k}-\bar{P}_{i-1;k}}{2H_{01}}\right)\right]\dfrac{1}{2H_{01}}}$$

$$\frac{+\left(\dfrac{AC}{БД}\right)^2\cdot\dfrac{\bar{h}^2}{\bar{\mu}\bar{H}_2^2}\Big|_{i;k}\left(\dfrac{\bar{P}_{i;k+1}-\bar{P}_{i;k-1}}{2H_{02}}\right)\cdot\left(\dfrac{\bar{T}_{i;k+1}-\bar{T}_{i;k-1}}{2H_{02}}\right)}{\left[1-\dfrac{\bar{h}^2}{\bar{\mu}\bar{H}_1^2}\left(\dfrac{\bar{P}_{i+1;k}-\bar{P}_{i-1;k}}{2H_{01}}\right)\right]\dfrac{1}{2H_{01}}}+\bar{T}_{i-1;k};$$

(3)

где

$$\bar{q}_1 = (q_1 - A_0)/A\,; \quad \bar{q}_2 = (\bar{q}_2 - Б_0)/Б -$$

безразмерные произвольно изменяющиеся переменные соответственно в направлении q_1 и q_2; A, A_0 и $Б$, $Б_0$ – характерные величины, определяющие геометрические параметры рассматриваемой области в направлении координатных осей;

$$\bar{H}_1 = H_1/C\,; \quad \bar{H}_2 = H_2/Д\,; \quad \bar{H}_3 = H_3/E -$$

коэффициенты Ламэ, приведенные к безразмерному виду, C, $Д$ и E – характерные величины;

$$\bar{h} = h/h_0 -$$

безразмерная величина, характеризующая толщину слоя смазывающего вещества, разделяющего взаимосопрягаемые поверхности в рассматриваемой точке; h_0 – минимальная толщина слоя смазывающего вещества (зазор) между взаимосопрягаемыми поверхностями;

$$\bar{\mu} = \mu/\mu_0 -$$

безразмерная величина, характеризующая динамический коэффициент вязкости, μ_0 – значение коэффициента динамической вязкости при определенной наперед заданной температуре;

$$\bar{p} = p h_0^2 / 6\mu_0 (U/\bar{H}_1) AC -$$

безразмерный параметр, характеризующий давление в рассматриваемой точке, возникающее в слое смазывающего вещества от гидродинамического эффекта;

$$\bar{p} = p/p_0 -$$

безразмерный параметр, характеризующий давление в рассматриваемой точке, возникающее в слое смазывающего вещества от гидростатического эффекта;

$$\bar{T} = h_0 \rho C E^2 / 6\mu_0 (U/A_1) AC = T^\circ K/T^* -$$

безразмерный параметр, характеризующий температуру в рассматриваемой точке, возникающую в слое смазывающего вещества.

Связь между величинами вязкости и температуры установлена зависимостью

$$\bar{\mu} = e^{-\gamma \Delta t + [0{,}0324 - 1{,}76 \cdot 10^{-4}(T - 273{,}15)]p} -$$

где $\gamma = \frac{T^*}{t^\circ}$, t° – температурная постоянная, принимаемая для рассматриваемого смазывающего вещества.

При этом, для задач, согласно которым в исследуемых областях имеют место избыточные давления, обусловленные только гидродинамическим эффектом, граничные условия полагают равенство нулю функции давления на всех границах и равенство нулю функции давления и первой производной от нее в направлении относительного перемещения сопрягаемых поверхностей на входной и выходной границах зоны избыточных давлений этой же области, положения которых определяются в ходе решения. Реализация граничных условий, полагающих равенство нулю функции давления и первой производной от нее требует, чтобы при решении всякий раз, когда в процессе итераций оказывается, что в каком-то узле функция давления принимает значение меньше нуля, принималось значение ее равным нулю и итерационный процесс продолжался.

Для областей, в которых развиваются давления, обусловленные гидростатическим эффектом, при разложении общего решения на сумму решений, равную количеству источников, граничные условия полагают равенство нулю функции давления на всех границах исследуемой области, за исключением границ источника, принятого ненулевым, на границах которого функция давления принимается равной единице.

В исследуемых областях, в которых имеют место избыточные давления, обусловленные гидродинамическим и гидростатическим эффектами, выполнение граничных условий на границах зон избыточных давлений, возникающих от гидродинамического эффекта, теряет смысл.

Граничные условия при численной реализации уравнения притока тепла (3) полагают значение температуры во входном сечении (входной границе) заданными, причем ее величина в процессе решения корректируется с учетом переноса тепла с выходной границы исследуемой области, если рассматривается опора с одной несущей (рабочей) областью или с выходной границы предшествующей области.

При решении уравнений (I и 2) в первом приближении целесообразно значения искомой функции в узлах по всему массиву принимать равным нулю. С целью экономии времени, необходимого для достижения величины наперед заданной невязки при решении рассматриваемых систем уравнений, можно итерационный процесс проводить на грубой сетке, которую при достижении необходимой сходимости следует измельчить до пределов, определяемых точностью решения. Такой подход в ряде случаев позволяет сократить необходимое машинное время в I5–20 раз.

При определении полей температур нахождение искомых функций в узлах, лежащих по контуру исследуемой области, производится в соответствующих направлениях сетки по значениям функций, лежащих в предшествующих узлах, т.е. индекс реализуемого алгебраического уравнения (3), оппроксимирующего исходное дифференциальное уравнение, должен соответствовать узлу, лежащему на границе, и включать в себя значение функций, найденных по уравнениям, разрешенным относительно этих предшествующих узлов.

Численно определив поля давлений, если исследуется область с несколькими источниками, можно найти все величины, характеризующие основные параметры элементарных областей. В тех случаях, когда исследуемая область имеет один источник или источники вообще отсутствуют, найденные параметры будут непосредственно и характеристиками рассматриваемой опоры или ее части.

Зная эксплуатационные параметры исследуемых областей, из которых состоит рассматриваемый узел (опора) жидкостного трения и элементарных областей, если в числе исследуемых есть многосвязные области (области с источниками), можно определить и основные эксплуатационные параметры всего узла, оперируя уже их характеристиками (интегральными величинами).

В общем виде уравнение равновесия сил, возникающих в слое смазывающего вещества и действующих на опору жидкостного трения, может быть записано как:

$$W=\left(W_x^2+W_y^2+W_z^2\right)^{1/2}=$$

$$=\left\{\left[\sum_{n=1}^{N_2}P_{x\,дин\,\Omega}+\sum_{i=1}^{N_1}\left(P_{x\,дин\,\Omega i}+\sum_{s=1}^{N}P_{x\,ст\,\Omega s}\right)\right]^2+\right.$$

$$+\left[\sum_{n=1}^{N_2}P_{y\,дин\,\Omega}+\sum_{i=1}^{N_1}\left(P_{y\,дин\,\Omega i}+\sum_{s=1}^{N}P_{y\,ст\,\Omega s}\right)\right]^2+$$

$$\left.+\left[\sum_{n=1}^{N_2}P_{z\,дин\,\Omega}+\sum_{i=1}^{N_1}\left(P_{z\,дин\,\Omega i}+\sum_{s=1}^{N}P_{z\,ст\,\Omega s}\right)\right]^2\right\}^{1/2},$$

где N_1 и N_2 – число самостоятельных (изолированных) областей, в которых происходит сопряжение соответствующих поверхностей опоры, разделенных слоем смазывающего вещества; N – число источников в рассматриваемой изолированной многосвязной области.

Переходя к соответствующим значениям проекций векторов несущих способностей $P_{к\,дин}$ и $P_{к\,ст}$ ($к = x; y; z$), а также вводя величину отношения давления в рассматриваемой камере к давлению в системе питания $\beta = P_{oj}/P_c$, получим

$$W = \Big(\Big\{\sum_{n=1}^{N_2}\mu_o \Pi_n \Big(\frac{\Pi_n}{H_{on}}\Big)^2\Big(\frac{U}{H_1}\Big)K_{px\,дин}\Omega_n + \sum_{i=1}^{N_1}\Big[\mu_o\Pi_i\Big(\frac{\Pi_i}{H_{oi}}\Big)^2\Big(\frac{U}{H_1}\Big)K_{px\,дин}\Omega_i +$$

$$+ P_c\Pi_i\sum_{s=1}^{2N}\beta_s K_{px\,ст}\Omega_s\Big]\Big\}^2 + \Big\{\sum_{n=1}^{N_2}\mu_o\Pi_n\Big(\frac{\Pi_n}{H_{on}}\Big)^2\Big(\frac{U}{H_1}\Big)K_{py\,дин.}\Omega_n +$$

$$+ \sum_{i=1}^{N_1}\Big[\mu_o\Pi_i\Big(\frac{\Pi_i}{H_{oi}}\Big)^2\Big(\frac{U}{H_1}\Big)K_{py\,дин}\Omega_i + P_c\Pi_i^2\sum_{s=1}^{N}\beta_s K_{py\,ст}\Omega_s\Big]\Big\}^2 +$$

$$+ \Big\{\sum_{n=1}^{N_2}\mu_o\Pi_n\Big(\frac{\Pi_n}{H_{oi}}\Big)^2\Big(\frac{U}{H_1}\Big)K_{pz\,дин}\Omega_n + \sum_{i=1}^{N_1}\Big[\mu_o\Pi_i\Big(\frac{\Pi_i}{H_1}\Big)^2\Big(\frac{U}{H_1}\Big)K_{pz\,дин}\Omega_i +$$

$$+ P_c\Pi^2\sum_{s=1}^{N}\beta_c K_{pz\,ст}\Omega_s\Big]\Big\}^2\Big)^{1/2}.$$

Следовательно, задача сводится к количественному определению величин давления в системе питания P_c и в рассматриваемых камерах подвода смазывающего вещества, которые характеризуются безразмерными параметрами β_j ($j = 1, 2, \dots N$).

Поставленная задача может быть решена на основании реализации системы уравнений баланса расходов смазывающего вещества, протекающего через каждый источник (камеру), с учетом параметров принятого дросселя, регулятора либо насоса-принятого гидравлического сопротивления (компенсатора) при фиксированном относительном расположении сопрягаемых поверхностей деталей опоры

$$Q_{1ком} = Q_{дин\Gamma_1} + Q_{ст\Gamma_{11}} + Q_{ст\Gamma_{12}} + \dots + Q_{ст\Gamma_{1N}};$$

$$Q_{2ком} = Q_{дин\Gamma_2} + Q_{ст\Gamma_{21}} + Q_{ст\Gamma_{22}} + \dots + Q_{ст\Gamma_{2N}};$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$Q_{Nком} = Q_{дин\Gamma_N} + Q_{ст\Gamma_{N1}} + Q_{ст\Gamma_{N2}} + \dots + Q_{ст\Gamma_{NN}},$$

где $Q_{ст\Gamma_{ij}}$ – количество смазывающего вещества, протекающего через контур (границы) рассматриваемой камеры $j = 1, 2, 3, \dots N$ (при $i = j$ – из рассматриваемой камеры и при $i \neq j$ в рассматриваемую камеру из других камер исследуемой области).

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

М412073

$$i=(1;2;3;\dots N)\delta_{кг};\quad \delta_{кг}=\begin{cases}1 & при\ j\neq i\\ 0 & при\ j=i\end{cases}$$

или

$$K_{др1}\bar{Q}(\beta_1)др_1=K_1+(\beta_1K_{Qстг11}-\beta_2K_{Qстг12}-$$

$$-\beta_3K_{Qстг13}-\dots-\beta_NK_{Qстг1N});$$

$$K_{др2}\bar{Q}(\beta_2)др2=K_2+(-\beta_1K_{Qстг21}+\beta_2K_{Qстг22}-$$

$$-\beta_3K_{Qстг23}-\dots-\beta_NK_{Qстг2N});$$

. . . . . .

$$K_{дрN}\bar{Q}(\beta_N)_{дрN}=K_N+(-\beta_1K_{QстгN1}-\beta_2K_{QстгN2}-$$

$$-\beta_3K_{QстгN3}-\dots+\beta_NK_{QстгNN}),$$

где $K_{дрj}$ (j = I,2,3, ..., N) – безразмерный коэффициент, характеризующий параметры принятого гидравлического компенсатора, системы питания и смазывающего вещества;

$\bar{Q}_{дрj}$ (j = I,2,3, ..., N) – безразмерная величина, характеризующая расход смазывающего вещества, протекающего через принятый тип гидравлического компенсатора;

$K_j=[\mu_0\Pi_i(U/H_i)K_{Qдинj}]/h_0^2P_c$ – безразмерная величина, характеризующая величину расхода смазывающего вещества, протекающего через границу (контур) рассматриваемой камеры от гидродинамического эффекта.

В качестве примера в табл. 2 приведены значения $K_{дрj}$ и $\bar{Q}(\beta_j)др_j$ для наиболее распространенных несаморегулируемых в процессе эксплуатации гидравлических компенсаторов и источников постоянной производительности.

В табл. 2 $d_к$ и $d_д$ – диаметры проходного сечения капилляра и диафрагмы; $l_к$ – длина капилляра; $C_д$ – коэффициент расхода смазывающего вещества, протекающего через диафрагму; ρ – плотность смазывающего вещества; $K_{рег}$ и $K_{нас}$ – расход

смазывающего вещества через регулятор и обеспечиваемый насосом постоянной производительности.

Таблица 2

Вид компенсатора (дросселя)	$K\partial p_j$	$\bar{Q}(\beta_j)\,\partial p_j$
Капилляр	$\dfrac{\pi d_к^4}{128 l_к h_0^3 P_c}$	$(1-\beta_j)$
Диафрагма с острыми кромками	$\dfrac{\pi \mu_0 d_д C_д}{h_0^3}\left(\dfrac{1}{\partial p P_c}\right)$	$(1-\beta_j)^{1/2}$
Регулятор расхода	$\dfrac{\mu_0 K_{рег}}{h_0^3 P_c}$	I
Непосредственное присоединение гидростатической опоры к насосу постоянной производительности	$\dfrac{\mu_0 K_{нас}}{h_0^3 P_c}$	I

Учитывая вышесказанное, несущая способность всей опоры в общем случае, определится как сумма составляющих, имеющих место от гидродинамического эффекта, возникающего в слое смазывающего вещества, разделяющего сопрягаемые поверхности при их относительном перемещении в n самостоятельных областях $(0 \le n \le N_2)$, в которых отсутствуют источники подвода смазывающего вещества, а также от гидростатического эффекта, возникающего в самостоятельных областях ($0 \le i \le N$), в которых имеются источники подвода смазывающего вещества S и от гидродинамического эффекта, возникающего в этих же областях (i -областях)

$$W=\Big\{\Big[\sum_{n=1}^{N_2}\mu_{on}\Pi_n\Big(\frac{\Pi_n}{h_{on}}\Big)^2\Big(\frac{U_n}{H_1}\Big)K_{px\,дин}\Omega_n+$$
$$+\sum_{i=1}^{N_1}P_c\Pi_i^2K_{wx\,ст}\Omega_i\Big]^2+\Big[\sum_{n=1}^{N_2}\mu_{on}\Pi_n\Big(\frac{\Pi_n}{h_{on}}\Big)^2\Big(\frac{U_n}{H_1}\Big)K_{py\,дин}\Omega_n+$$
$$+\sum_{i=1}^{N_1}P_c\Pi_i^2K_{wy\,ст}\Omega_i\Big]^2+\Big[\sum_{n=1}^{N_2}\mu_{on}\Pi_n\Big(\frac{\Pi_n}{h_{on}}\Big)^2\Big(\frac{U_n}{H_1}\Big)K_{pz\,дин}\Omega_n+$$
$$+\sum_{i=1}^{N_1}P_c\Pi_i^2K_{wz\,ст}\Omega_i\Big]^2\Big\}^{1/2}, \qquad (4)$$

или в проекциях

$$W_x = W\sin\theta_w\cos\Phi_w = \sum_{n=1}^{N_2}\mu_{on}\Pi_n\left(\frac{\Pi_n}{H_{on}}\right)^2\left(\frac{U_n}{H_1}\right)K_{px\,дин\,\Omega_n} + \sum_{i=1}^{N_1}P_c\Pi_i^2K_{wx\,cm\,\Omega_i};$$

$$W_y = W\sin\theta_w\sin\Phi_w = \sum_{n=1}^{N_2}\mu_{on}\Pi_n\left(\frac{\Pi_n}{H_{on}}\right)^2\left(\frac{U_n}{H_1}\right)K_{py\,дин\,\Omega_n} + \sum_{i=1}^{N_1}P_c\Pi_i^2K_{wx\,cm\,\Omega_i};$$

$$W_z = W\cos\theta_w = \sum_{n=1}^{N_2}\mu_{on}\Pi_n\left(\frac{\Pi_n}{H_{on}}\right)^2\left(\frac{U_n}{H_1}\right)K_{pz\,дин\,\Omega_n} + \sum_{i=1}^{N_1}P_i\Pi_i^2K_{wz\,cm\,\Omega_i}, \qquad (5)$$

где $K_{wq\,cm\,\Omega_i}$ - безразмерный коэффициент, характеризующий несущую способность i гидростатической либо гибридной опоры жидкостного трения ($q = x, y, z$).

$$K_{wq\,cm\,\Omega_i} = \frac{\mu_{oi}}{P_c\Pi_i}\left(\frac{\Pi_i}{H_{oi}}\right)^2\left(\frac{U_i}{H_{1i}}\right)K_{pq\,дин\,\Omega_i} + \sum_{s=1}^{N}\beta_s K_{pq\,cm\,\Omega_s}.$$

Анализируя зависимости (4)-(5), нетрудно заметить, что при $n = 0$ рассматриваемая опора жидкостного трения будет гидростатической либо гибридной (гидродинамостатической, гидростатодинамической), т.е. будет такой случай, когда отсутствуют в опоре изолированные самостоятельные области, в которых возникают избыточные давления от гидродинамического эффекта. При этом, в зависимости от функционального назначения, конструктивное исполнение рассматриваемой опоры может быть выполнено как сочетание самостоятельных областей i с количеством источников S каждая, либо в виде одной области $i = 1$ с любым числом, расположением и размерами источников S (камер подвода смазывающего вещества).

При $i = 0$ возникает ситуация чисто гидродинамической опоры жидкостного трения, состоящей из n областей, в которых отсутствуют источники и развиваются избыточные давления от гидродинамического эффекта.

3. Техническое оснащение экспериментальных работ, проводимых по исследованию опор жидкостного трения

Для подтверждения правильности полученных теоретически результатов, а также выявления ряда закономерностей подобрано и разработано оборудование, позволяющее производить экспериментальные исследования опор жидкостного трения с параметрами, отвечающими характеристикам их эксплуатации в реальных условиях. При выполнении настоящей работы использовались стенды: для исследований плоских гидростатических подушек, упорных гидростатических и гидродинамических подшипников; гидростатических опорных подшипников с частичным углом охвата, а также опорных гидродинамических и гидростатических подшипников. С целью имитации условий работы реальных машин разработаны станок-стенд для исследования гидростатических шпиндельных опор тяжелых станков и стенд для исследований гидростатических опор, устанавливаемых вместо опорных валков на жестких балках по всей длине бочек рабочих валков в клетях прокатного оборудования. Для испытаний узлов систем питания опор жидкостного трения разработан специальный стенд. Решение задач, связанных с расчетом плоских гидростатических опор, произведено на электролитической моделирующей установке.

При исследованиях параметров слоя смазывающего вещества производился контроль и измерения его толщин и давлений как дискретно, так и с непрерывной записью в соответствующих сечениях исследуемой области. Для чего использовались индуктивные малогабаритные датчики П-образного и чашечного типов, Ш-образные индуктивные датчики, индуктивные датчики трансформаторного типа и емкостные датчики, а также манганиновые датчики давлений и датчики давлений с рабочей цилиндрической оболочкой. В некоторых случаях сигнал снимался непосредственно с чувствительных элементов манометров, путем наклеивания на них тензодатчиков. Разработано и реализовано устройство, позволяющее измерять величины давлений и толщин слоя смазывающего вещества непосредственно в одной точке. Для измерения усилий, моментов и скоростей относительного перемещения, что является при проведении натурных экспериментальных исследований весьма нужными и трудно измеряемыми параметрами, разработаны соответствующие датчики и системы. Методики экспериментальных исследований, разработанные в процессе выполнения настоящей работы, позволили произвести опытное изуче-

ние опор жидкостного трения как на стендах в лабораторных условиях, так и на действующем оборудовании в процессе эксплуатации непосредственно в производственных условиях, что для узлов тяжелых машин и механизмов в ряде случаев является основным.

4. О некоторых аспектах работы гидростатических опор с саморегулирующими компенсирующими системами

Одним из направлений повышения жесткости гидростатических опор, улучшения их энергетических характеристик является использование в качестве компенсирующих устройств регуляторов расхода с обратной связью по давлению. Принцип действия таких регуляторов заключается в изменении гидравлического сопротивления цепей питания несущих карманов (камер) при изменении полей давлений в опоре. При этом достигается такое перераспределение смазывающего вещества между несущими карманами, при котором с увеличением (уменьшением) нагруженного кармана расход смазки через него также увеличивается (уменьшается). Конструктивно управляющий элемент регулятора может быть выполнен в виде мембраны, подпружиненного цилиндрического или конического золотника, имеющего свободу перемещений в осевом или радиальном направлениях.

Совместное решение уравнений расходов смазывающего вещества, протекающего через регулятор и камеру опоры, позволяет определить параметры потока смазки через рассматриваемый карман для данного положения сопрягаемых поверхностей. Если для этого положения выполняется условие равенства производных функций расходов по давлению в карманах, то жесткость в слое смазывающего вещества бесконечно велика. Если производная функции расхода смазывающего вещества, протекающего через сопло регулятора, по давлению больше производной функции расхода смазывающего вещества, протекающего через рассматриваемый карман опоры, смазывающий слой обладает "отрицательной" жесткостью: одна из сопрягаемых поверхностей, следовательно, деталь или весь подвижный узел смещается на нагрузку, что в ряде случаев позволяет компенсировать силовые или температурные деформации сопрягаемых поверхностей. Для постоянных компенсаторов (капилляр, жиклер, диафрагма, система насос-карман) режим бесконечно большой или "отрицательной" жесткости опоры получен быть не может. Такой режим работы гидростатической опоры может быть достигнут только в случае применения регуляторов расхода, например, с об-

ратной связью по давлению при правильном выборе их основных параметров.

Анализ поведения функции расхода смазывающего вещества, протекающего через регулятор, позволил определить наиболее приемлемый ее характер из условия наиболее возможного диапазона работы опоры в регулярном режиме – режиме, при которым выполняется условие высокой жесткости слоя. В качестве примера рассмотрены два наиболее распространенных типа регуляторов расхода смазывающего вещества с обратной связью по давлению: золотниковый и мембранный. Экспериментальные исследования регуляторов на стенде и действующем оборудовании позволили сделать вывод о том, что их применение целесообразно в прецизионном металлообрабатывающем оборудовании с высокой жесткостью замыкающих цепей. В противном случае, получение высокой жесткости слоя смазывающего вещества теряет смысл.

5. Плоские опоры жидкостного трения в узлах возвратно-поступательного движения

В последние 10-15 лет в узлах возвратно-поступательного движения все чаще применяются гидростатические опоры, однако рассмотрение результатов исследований плоских гидродинамических опор не потеряло своего значения и на сегодняшний день, а также весьма интересно, с точки зрения сопоставления получаемых результатов. Решения в изотермической постановке дали полное совпадение с данными А.Мичела и приведенными в работах М.Н.Яновского, Н.Типея и др. Однако получаемые при этом результаты не прогнозируют несущей способности для опор с центральным упором. Интересны и результаты исследований, проведенных С.М.Роде, Э.Гун Бином в ТУГД постановке. Решение в неизотермической постановке дало удовлетворительное согласование с данными этих авторов. Показано, что на положение главного вектора оказывают влияние сорт смазывающего вещества, его минимальная толщина, скорость и т.д.

Исследование гидростатических опор показало удовлетворительное согласование результатов, полученных теоретически (в предположении изотермического течения), с данными опыта, что позволило осуществить внедрение этого прогрессивного вида опор в узлы возвратно-поступательного движения уникального тяжелого оборудования с расширением его технологических возможностей и увеличением межремонтных сроков. Положительные результаты экс-

плуатации модернизированного оборудования в течение трех-пяти лет позволили ходатайствовать в 1973 г. о выпуске аналогичного оборудования с гидростатическими направляющими.

6. Плоские опоры жидкостного трения для узлов с вращательным движением (подпятники).

Решение задач для опор гидродинамического типа с подушками в форме кольцевых секторов в неизотермической постановке с учетом переноса тепла дало удовлетворительное согласование с данными эксперимента. Удовлетворительно согласование и с результатами исследований В.А.Максимова, Г.С.Баткиса, М.Б.Хадиева, проведенных в ТУГД постановке, а также с данными экспериментальных работ Н.Д.Москалева, А.Е.Александрова, М.А.Иванова, Б.Стернлихта и др. Показано, что немаловажную роль в расхождениях расчетных величин и данных практики играют деформации сегментов. Однако, например, при создании крупных подпятников уже сейчас разработаны конструктивные меры, значительно уменьшающие температурные деформации, а в ряде случаев практически исключающие их. Так, вместо однослойных сегментов, перепад температуры по толщине которых достигает значительных величин, применяются двойные сегменты. Результаты натурных испытаний, проведенных А.Е.Александровым на подпятниках агрегатов Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС, показали, что у однослойного сегмента величина температурного перепада достигает 25^{0}К, в то время как перепад температур по толщине двуслойного сегмента составляет всего 5^{0}К. Уменьшение деформаций сегментов идет и по пути уменьшения размеров последних.

На Харьковском турбинном заводе им.С.М.Кирова для уменьшения деформаций применяются конструкции сегментов, состоящих из тонкой пластины, рабочая сторона которой покрыта баббитом и массивного основания, разделенных между собой слоем теплоизолирующего материала. Такая конструкция практически исключила тепловые деформации сегментов. Для борьбы с деформациями от нагрузок на этом же заводе применяются упорные подшипники с двуслойными сегментами, у которых с тыльной стороны тонкой пластины, рабочая сторона которой покрыта тонким слоем баббита, выполнены подвнутрения определенной формы и размера. Весьма перспективным направлением борьбы с деформациями сегментов следует считать развивающееся направление создания термоконстантного сегмента с рабочей и тыльной сторон. Все это подтверждает правильность мысли о

возможности рассмотрения опор с недеформируемыми сопрягаемыми поверхностями.

Хорошие результаты получены при расчете многокамерных гидростатических упорных подшипников. Расхождения по несущей способности не превысили -10 ÷ +2 %, а по расходу смазывающего вещества - 15÷20 %, что позволило дать рекомендации по проектированию, расчету и внедрению упорных подшипников рассматриваемых конструкций ряду предприятий тяжелого машиностроения.

7. Сферические опоры жидкостного трения

Сферические опоры в технике встречаются редко, несмотря на то, что, казалось бы, могут, благодаря своей геометрии, компенсировать некоторые погрешности сборки, а также деформации, возникающие в процессе эксплуатации. Исследований опор, работающих в жидкостном режиме со сферическими несущими поверхностями, тоже мало. Анализ эксплуатационных параметров сферических беззазорных опор, воспринимающих преимущественно радиальную нагрузку показал, что при прочих равных условиях и габаритах они обладают несколько повышенной несущей способностью по сравнению с цилиндрическими. Однако воспринимаемая ими осевая нагрузка при этом на порядок ниже радиальной. В связи с этим пришлось отказаться от сферических опор барабанов тяжелых мельниц при постановке косозубого венца, вызвавшего появление значительных осевых нагрузок. Работа сферических опор при длинных роторах требует постановки линейных подшипников, компенсирующих температурные и силовые деформации, что усложняет конструкцию машины в целом. Выполнение сферических опор с разными радиусами кривизны сопрягаемых поверхностей приводит к большим контактным напряжениям в состоянии покоя, что влечет появление остаточных деформаций на поверхностях, покрытых антифрикционными материалами, а также к сдвигу их слоев и задирам в периоды пуска и останова. Применение сферических гидростатических опор в узлах, воспринимающих произвольно направленную нагрузку, требует выполнения их многокамерными. Согласование результатов теоретических исследований с данными опыта лежит в тех же пределах, что и при исследованиях плоских опор возвратно-поступательного и вращательного движений. Учитывая технологическую сложность изготовления сферических поверхностей больших диаметров, следует в каждом конкретном случае исходить не только из условий решения технической за-

дачи путем их применения, а и технико-экономических соображений.

8. Цилиндрические опоры жидкостного трения (радиальные)

Беззазорные цилиндрические с частичным углом охвата опоры обладают достаточно высокой несущей способностью, соизмеримой с несущей способностью опор с различными радиусами сопряжения. Существенное влияние на характеристики беззазорных радиальных опор оказывают граничные условия, накладываемые при решении на границу области избыточных давлений, которая отыскивается в процессе решения. Это позволяет сделать вывод об ошибочности взглядов А.Камерона, утверждающего, что граничные условия во входном сечении носят академический характер и не имеют практического значения.

Удовлетворительное согласование теории и опыта позволило внедрить рассматриваемые сопряжения в узлы опор барабанов тяжелых мельниц. Для облегчения режима работы мельниц в периоды пуска разработана система, основанная на гидростатическом принципе разделения сопрягаемых поверхностей, незначительно уменьшающая несущую способность при работе опоры в гидродинамическом режиме. Многолетняя эксплуатация тяжелых мельниц ММС 70-23 на Лебединском, Ново-Ингулецком, Навои горнообогатительных комбинатах, а также на комбинатах Алданзолото и Якуталмаз показала, что применение опор, имеющих возможность работать в ряде случаев как гидростатические, обеспечило работоспособность мельниц в условиях, не соответствующих нормальной работе опор в гидродинамическом режиме, что позволило повысить производительность, надежность и срок эксплуатации оборудования. Удовлетворительные результаты исследований гидростатических одно- и многокамерных опор позволили внедрить их в качестве шпиндельных опор тяжелых токарных станков; в узлах люнетов; дополнительных опор, устанавливаемых под планшайбы шпинделей для уменьшения, а в ряде случаев полного исключения, прогиба последних; опор барабанов уникальных тяжелых мельниц с диаметром цапф 3 м и т.д.

Создание опор с гарантированным слоем смазывающего вещества позволило разработать несколько оригинальных конструкций тяжелых машин, по компоновке отличающихся от традиционных, так, например, разработаны и внедрены шпиндели тяжелых токарных станков с дополнительными опорами, установленными под планшайбы передней и задней бабок, позволившие разгрузить дорогостоящие опоры качения этих узлов. Разработана и испытана в лабораторных

и промышленных условиях конструкция валковой группы рабочих клетей прокатных станов. Эта конструкция позволяет отказаться от дорогостоящих, трудоемких в изготовлении опорных валков, масса которых уже сейчас достигает 100-125 т. При этом рабочие валки по всей длине бочки опираются на гидростатические многокамерные с частичным углом подшипники, установленные на жестких балках. Разработки промышленных вариантов рабочих клетей безопорных валков ведутся уже сейчас во ВНИИметмаше, головном институте металлургического машиностроения нашей страны, и в Уральском отделении проблем машиностроения АН СССР (г. Свердловск).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

– Реализация жидкостного режима работы в процессе всей эксплуатации узлов, поверхности детали которых находятся в состоянии относительного движения или покоя и передают или воспринимают нагрузки, позволила увеличить срок службы этих узлов в 2-3 раза, повысив надежность работы всей машины или механизма за счет значительного уменьшения износа сопрягаемых поверхностей, исключения задиров и сдвигов слоев антифрикционных материалов в периоды переходных режимов, пуска и останова, а также за счет уменьшения пусковых нагрузок.

– Рассмотрение поведения потока смазывающего вещества в зазоре между сопрягаемыми поверхностями в ортогональной криволинейной системе координат позволило разработать системный подход к исследованиям и расчету опор жидкостного трения независимо от геометрических параметров сопрягаемых поверхностей.

– Результаты сопоставления данных, полученных при решении исходных уравнений методами конечных разностей и конечных элементов, позволили в качестве базового остановиться на первом.

– При расчетах и исследованиях гидростатических опор удовлетворительные результаты дает решение исходных уравнений в двумерной изотермической постановке – расхождения с результатами, полученными при решении этих уравнений в неизотермической постановке, составляют не более 5 % при скоростях до 100 м/с, минимальных толщинах слоя смазывающего вещества более 20 мкм и вязкости смазывающего вещества при температуре 203°К, не превышающей 0,04 Нс/м^2.

– Разработанная математическая модель процессов, происхо-

дящих в областях с источниками, позволила количественно определить их параметры, независимо, являются ли они положительными, отрицательными или нулевыми, что имеет смысл, например, при исследованиях и расчетах многокамерных гидростатических опор или опор гидродинамического типа, на рабочих поверхностях которых имеются камеры для подвода смазывающего вещества под высоким давлением в периоды пуска, реверса и останова.

– Разложение общего решения в многосвязных областях на сумму решений в элементарных областях устанавливает количественные соотношения между гидродинамическими и гидростатическими эффектами, что позволяет, варьируя геометрическими параметрами, конструктивными решениями и подбором соответствующих дросселей или регуляторов расхода, реализовать опору с заданными эксплуатационными характеристиками.

– Варьируя областями, в которых возникают или создаются избыточные давления от гидродинамического и гидростатического, с учетом гидродинамической составляющей эффектов, возможно создать опоры жидкостного трения с наперед заданными параметрами слоя смазывающего вещества, либо опоры с управляемыми в процессе эксплуатации характеристиками, т.е. опоры, позволяющие за счет малых перемещений позиционировать подвижные узлы по отношению к базовым, например, компенсируя деформации или износ рабочих органов.

– Стенды и установки, на которых произведены экспериментальные исследования моделей и натурных образцов опор жидкостного трения, обеспечили проведение опытов в режимах, соответствующих, а в ряде случаев и превышающих режимы эксплуатации опор тяжелых машин.

– Разработанные методики экспериментальных исследований параметров тонкого слоя смазывающего вещества, в том числе включающие в себя методы измерений его толщины и давлений, возникающих в нем, с непрерывной записью этих функций, в соответствующих сечениях исследуемой области, на ленту осциллографа, позволили произвести сопоставление дифференциальных величин, вытекающих из уравнений связи и безразмерных основных критериальных зависимостей, определенных теоретически и найденных экспериментально, что сделало возможным результаты единичного опыта распространить на целую группу опор жидкостного трения.

– Результаты исследований регуляторов расхода с обратной связью по давлению, работающих в комплексе с гидростатическими опорами, позволили оптимизировать их по геометрическим параметрам, что обеспечило практически постоянную толщину (близкую к бесконечности жесткость) слоя смазывающего вещества, разделяющего сопрягаемые поверхности опор в широком диапазоне изменения внешней нагрузки.

– Хорошее согласование теории и практики дает решение исходных уравнений гидродинамической теории смазки в двумерной изотермической постановке для опор гидростатического типа и в неизотермической постановке при граничных условиях, полагающих равенство нулю функции давлений и первой производной от нее в направлении относительного перемещения сопрягаемых поверхностей в исследуемой области на границах зоны избыточных давлений, которые определяются в процессе численной реализации рассматриваемой задачи, для опор гидродинамического типа, а также при граничных условиях, учитывающих перенос тепла с предыдущей исследуемой области на рассматриваемую или с выходной кромки на входную.

– Анализ результатов исследований, взятых в качестве примера, плоских опор жидкостного трения возвратно-поступательного и вращательного движений, сферических и цилиндрических, преимущественно с сопрягаемыми поверхностями равной кривизны, показал, что согласование данных теории и эксперимента по несущей способности для опор гидродинамического типа составляет (–15 ÷ 10) %, по потерям мощности, затрачиваемой на преодоление сил вязкого сдвига (–7 ÷ –15)%, а для опор гидростатического типа соответственно (–15 ÷ +5) % и (–15 ÷ 10) % при расхождениях расходных характеристик, лежащих в пределах (–15 ÷ +20) %.

– Сопоставление результатов проведенных исследований с данными отечественных и зарубежных исследователей показали, что расхождения сравниваемых параметров опор жидкостного трения лежат в таких же пределах, как и при сравнении данных теории и эксперимента, полученных автором.

– При проектировании опор жидкостного трения следует организовать подвод охлажденного смазывающего вещества таким образом, чтобы оно попадало непосредственно в область избыточных давлений, желательно со струйным охлаждением свободных участков, с целью максимально возможного охлаждения перемещающейся поверхности и исключения (разрушения) нагретого слоя, перенося-

щего тепло с выходной кромки (границы) предшествующей области на рассматриваемую или с выходной границы на входную, если опора имеет одну рабочую область (область избыточных давлений).

– При скоростях выше 20–25 м/с желательно, чтобы свободные участки перемещающихся деталей, например, пяты в упорном подшипнике, не находились в ванне смазывающего вещества, так как в противном случае потери мощности значительно возрастают, составляя в ряде случаев (40–50) % и более от общих потерь в опоре.

– Разделение сопрягаемых поверхностей гарантированным слоем смазывающего вещества в процессе всей работы машины или механизма при эксплуатации за счет реализации гидростатического принципа смазки исключает их износ и обеспечивает плавность перемещений во всем диапазоне скоростей, включая и скорости, близкие к нулю, что является необходимым и обязательным требованием при применении систем управления с цифровой индексацией и ЧПУ.

– Натурные экспериментальные исследования опор жидкостного трения, проведенные в условиях эксплуатации, согласно разработанным методикам, позволили получить информацию, нужную конструкторам и расчетчикам не только о работе самих опор, а и о параметрах других узлов или всей машины в целом.

– Реализация гарантированного слоя смазывающего вещества в парах трения заданных параметров в процессе всей эксплуатации позволила разработать ряд оригинальных узлов, обеспечивающих создание некоторых тяжелых машин принципиально новой компоновки.

– Удовлетворительное согласование теории с данными экспериментов, проведенных на стендах в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации на действующем оборудовании, позволило по запросам промышленных предприятий тяжелого машиностроения с целью практической реализации результатов, полученных в процессе проведения исследований и их внедрения в конкретных узлах подвижных сопряжений машин и механизмов согласно планам научно-исследовательских работ НИИПТмаша, утвержденным Министерством тяжелого и транспортного машиностроения, выполнить 24 научно-исследовательские работы с экономическим эффектом от внедрения более двух миллионов рублей в год.

По теме диссертации опубликовано 105 работ и один обзор: Применение гидростатических опор при модернизации тяжелых ме-

таллорежущих станков. - М. : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1974, 17-74-2. - 92 с., в том числе, например, в журналах : Вестник машиностроения - 6 статей; Энергомашиностроение - 6 статей; Машиноведение - 6 статей; НИИИНФОРМТЯЖМАШ - 12 статей; Детали машин (Республиканский межведомственный научно - технический сборник. - Киев: Техника) - 10 статей.

При этом основные научные результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в следующих самостоятельных работах:

1. Влияние компенсаторов на основные характеристические величины гидростатических опор. - Примен. гидравлич. приводов и др. средств повыш. качества и надеж. в ПТМ машиностроении: Тез. докл. Республ. конф. - Харьков, 1969, с. 98-100.
2. К расчету опор скольжения с экстремально низким износом. - - Станки и режущие инструменты: Республ. межвед. научн. - - техн. об. - Харьков, гос. университет, 1970, № 12, с.10-12.
3. К вопросу теоретического исследования перспективных опор металлургического оборудования. - Повышение надеж. и долговеч. оборуд. на предприят. черной металлург.: Тез. докл. Республ. конф. - Днепропетровск, 1970, с. 166-167.
4. Модернизация тяжелого фрезерно-расточного станка мод. НР-3. - Станки и инструмент, 1973, № 1, с. 13-14.
5. Вопросы расчета, проектирования и испытаний упорных подшипников. - Вестник машиностроения, 1973, № 11, с. 7-10.
6. Применение гидростатических направляющих при модернизации тяжелых расточных станков. - М. : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1974, 20-74-3, сер. 10-08, -2 с.
7. Шпиндельные гидродинамические подшипники с самоустанавливающимися вкладышами. - Станки и инструмент, 1975, № 3, с. 19-21.
8. Проектирование радиальных опор тяжелых машин. - Вестник машиностроения, 1976, № 3, с. 25-28.
9. Теория и практика применения упорных нереверсивных подшипников, состоящих из подушек в форме кольцевых секторов. - - Применение контактной гидродинамики к исследованию деталей машин: Тр. первой Всесоюз. Конф. Контактно-гидродин. теор. смаз. и ее практ. примен. в тех. - Куйбышев, 1976, с. 36-45.

10. Проектирование радиальных опор тяжелых машин. – Вестник машиностроения, 1976, № 3, с. 25-28.
11. К расчету опорных гидродинамических подшипников с частичным углом охвата. – Машиноведение, 1973, № 6, с. 90-95.
12. Исследование, расчет и проектирование упорных подшипников. – Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела энергетических установок: Сб. научн. тр. / АН БССР, ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, ин-т ядер. энерг. – Минск, 1977, ч. III, с. 130-162.
13. Гидродинамические опоры тяжелых машин. – М. : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1978, 064-78, сер. 10-04, -4 с.
14. Разработка, исследование и внедрение опор жидкостного трения современных тяжелых машин. – Трение и износ в машинах : Тез. докл. Всесоюз. конф. – Челябинск, 1979, с. 178.
15. Один из возможных путей исследования, расчетов и проектирования гидростатических многокамерных опор. – Машиноведение, 1980, № 4, с. 98-104.
16. К вопросу расчета опор жидкостного трения гидродинамического типа современных тяжелых машин. – Трение и износ в машинах: Докл. Всесоюз. конф. – Челябинск, 1980, с. 155-164.
17. Многосегментные радиальные подшипники: Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по компрессоростроению. Секция опор и уплотнений. – Ленинград, 1981, с. 209.
18. О переносе тепла на входную границу исследуемой области с ее выходной границы или области ей предшествующей. – Трение и смазка в машинах : Тез. докл. Всесоюз. конф. – Челябинск, 1983, с. 37-39