

АВТОРЕФ
Б 18

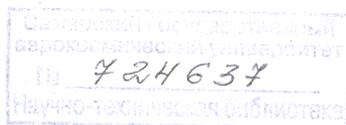
На правах рукописи

БАЙБОРОДОВ ЮРИЙ ИВАНОВИЧ

**Разработка методов и средств повышения прочности,
работоспособности и долговечности тяжело нагруженных
опор скольжения роторов энергетических установок**

Специальность 01.02.06 - динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Самара 2008

Работа выполнена при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Анализ развития машиностроения показывает, что одной из главных тенденций при проектировании и создании машин является всё возрастающая единичная мощность агрегатов.

В то же время неизбежным следствием указанной тенденции является рост габаритов машин, скоростей вращения роторов, увеличение статических и динамических нагрузок на опоры осей и валов. В результате в ряде случаев прочность, работоспособность и долговечность машин стала определяться прочностью, работоспособностью и долговечностью опор роторов.

Указанные факторы играют особо важную роль в энергетических установках гидравлических и тепловых электростанций, где единичная мощность энергоблоков достигает 600-800 МВт. В таких машинах применяются опоры скольжения, основным материалом для изготовления которых является баббит. Однако, как показывает опыт, баббитовые опоры скольжения обеспечивают требуемую прочность, работоспособность и долговечность лишь до определенных пределов статических и динамических удельных нагрузок, температур и скоростей скольжения. Кроме того, баббитовые опоры скольжения не обладают вибродемпфирующими свойствами и не компенсируют перекосы валов и осей.

Аварийные остановки гидроагрегатов приводили к снижению мобильности ГЭС, являющихся самым эффективным регулятором загрузки крупных кольцевых энергосистем нашей страны. Они наносили ущерб, связанный с недовыработкой электроэнергии и внеплановым простоем в ремонте повредившихся опор скольжения.

Повышение прочности, работоспособности и долговечности опор скольжения стало одной из актуальнейших крупных проблем в гидро- и теплоэнергетике в последние 25-30 лет.

Вполне естественно, что для решения возникшей проблемы требовалось провести глубокие и всесторонние теоретические и экспериментальные исследования, позволяющие обеспечить не только прочность, работоспособность и долговечность и улучшенные технические характеристики машин и оборудования, но и увеличить эффективность работы системы «человек – машина», что имеет большое социальное значение.

Цель и задачи исследований.

Целью диссертации является повышение прочности, работоспособности и долговечности тяжело нагруженных опор скольжения роторов энергетических установок. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Анализ существующего состояния вопроса и существующих методов и средств обеспечения прочности, работоспособности и долговечности опор скольжения.
2. Разработка моделей работы опор скольжения и выполнение исследований динамической напряженности опор скольжения различных конструкций, работающих при пусках и остановках роторов под нагрузкой и в установившемся режиме работы энергетических установок.
3. Разработка методов проектирования и технологии изготовления опор скольжения повышенной прочности, работоспособности и долговечности.
4. Разработка и изготовление опытных экземпляров новых тяжело нагруженных радиальных и осевых опор скольжения роторов энергетических установок и их экспериментальные исследования.
5. Внедрение разработанных новых конструкций опор скольжения на отечественных и зарубежных энергетических установках.

Методы исследований.

Теоретический с использованием гидродинамической теории смазки (включая методы контактно-гидродинамической модели работы упругодеформирующихся трущихся поверхностей, разделенных слоем смазки), теории упругости, прочности.

Экспериментальный, осуществляющийся на стендах лаборатории и на промышленных объектах путем натуральных испытаний.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Белоусов
Анатолий Иванович

доктор технических наук,
профессор Громаковский
Дмитрий Григорьевич

доктор технических наук,
профессор Кулаков
Геннадий Алексеевич

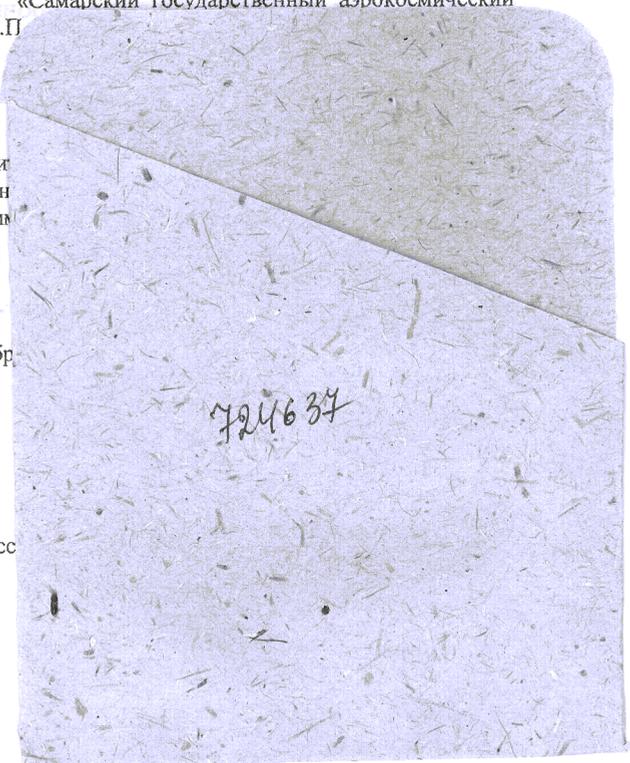
Ведущая организация: Филиал ОАО «ГидроОГК» - «Жигулевская ГЭС».

Защита состоится 31 октября 2008 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва», 34, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва».

Автореферат разослан 15 сентября 2008 г.

Ученый секретарь
доктор технических наук, профессор



Научная новизна работы

1. Разработаны модели, учитывающие влияние упругих деформаций поверхностей трения в радиальных и осевых опорах скольжения, на несущую способность смазочного слоя, форму зазора и распределения в нём гидродинамических давлений.

2. На основании созданных моделей разработан метод проектирования упругодеформирующихся опор скольжения повышенной прочности, работоспособности и долговечности за счет обеспечения оптимального распределения гидродинамических давлений между поверхностями трения.

3. Созданы принципиально новые конструкции композитных радиальных и осевых эластичных металлопластмассовых (ЭМП) опор скольжения, обладающих высокой прочностью, работоспособностью и долговечностью.

4. Разработан метод определения координат центра гидродинамических давлений (МОКЦД) в окружном и радиальном направлении в самоустанавливающихся ЭМП сегментах с учетом податливости покрытия, позволяющий проектировать и устанавливать ЭМП сегменты в подпятниках гидроагрегатов с оптимальным окружным и радиальным эксцентриситетом, обеспечивающим наибольшую грузоподъемность, прочность и долговечность ЭМП сегментов за счет исключения их перекоса относительно зеркала пяты в радиальной плоскости и создания формы зазора в окружном и радиальном направлении, обеспечивающей наибольшую несущую способность смазочного слоя и грузоподъемность опор скольжения. Научно-технический приоритет способа установки подтвержден патентом РФ № 2262013 от 10.10.2005 г.

5. Теоретически и экспериментально определены рациональные режимы торможения роторов вертикальных энергетических установок ГЭС, обеспечивающие работу ЭМП опор скольжения без повреждения при смазке маслом «Турбинное-30» при удельной нагрузке до 6,5 МПа, снижающие износ тормозных колодок в 16–30 раз.

6. Разработана новая технология изготовления ЭМП опор скольжения с наперед заданными физико-механическими характеристиками, обеспечивающими высокую прочность, работоспособность и долговечность опор скольжения.

7. Теоретически и экспериментально доказано, по критериям: режим трения, температура, пусковая работоспособность и долговечность, - что величина допустимой удельной нагрузки на ЭМП сегменты подпятников гидроагрегатов составляет 10,6 МПа, а долговечность не менее 20 лет, что подтверждено актами внедрения на Братской ГЭС, и это достижение дает возможность создавать гидроагрегаты нового поколения с единичной мощностью 1000 МВт и нагрузкой на подпятник 60-70 МН.

8. Теоретически и экспериментально доказана возможность создания крупногабаритных радиальных ЭМП опор скольжения, смазываемых водой вместо масла при удельной нагрузке 3,5 МПа и скорости скольжения 62,8 м/с и обеспечивающих высокую прочность, работоспособность и долговечность при установившемся режиме работы ротора, а также при выбеге без торможения.

Практическая значимость.

Практическая значимость проведенных в диссертационной работе исследований заключается в следующем:

1. Созданные новые ЭМП опоры скольжения, по сравнению с традиционно применяющимися баббитовыми, позволили увеличить прочность более, чем в два раза, пусковую работоспособность – в тысячи раз, долговечность – в 3-5 раз, что подтверждено актами внедрения.

2. Разработанный метод определения координат центра гидродинамических давлений (МОКЦД) позволяет проектировать и устанавливать ЭМП сегменты в подпятниках

гидроагрегатов с окружным и радиальным эксцентриситетами, обеспечивающими максимальную прочность и долговечность за счет исключения перекоса ЭМП сегментов относительно зеркала пяты в радиальной плоскости и создания формы зазора в окружном и радиальном направлении, обеспечивающей наибольшую несущую способность смазочного слоя и грузоподъемность сегментов, что подтверждено актами о результатах испытаний, технической справкой Жигулевской ГЭС, а научно-технический приоритет разработанного метода подтвержден патентом РФ № 2262013 от 10.10.2005 г.

3. Разработанные методы расчета и технология изготовления обеспечивают повышение прочности, работоспособности и долговечности опор скольжения путем создания новых конструкций ЭМП скольжения с наперед заданными физико-механическими характеристиками и новой макрогеометрией, обеспечивающими высокую удельную нагрузку (до 10,6 МПа), что позволит создавать гидроагрегаты нового поколения с единичной мощностью один 1000 МВт и нагрузкой на подпятник (60-70) МН, а научно-технический приоритет новых конструкций ЭМП опор скольжения и технологии их изготовления подтверждены авторскими свидетельствами на изобретения СССР, патентами РФ и патентами зарубежных стран.

4. Достигнута высокая прочность, работоспособность и долговечность подпятников и высокая мобильность отечественных ГЭС путем применения в них новых ЭМП опор скольжения, что подтверждено актами внедрения.

5. Обеспечена возможность создания прочных, работоспособных и долговечных радиальных ЭМП опор скольжения, работающих при смазке водой, на удельную нагрузку до 3,5 МПа, что открыло реальную перспективу модернизации существующих турбогенераторов и создания турбогенераторов нового поколения для тепловых электростанций, актуальность которой подтверждена Программой РАО «ЕЭС России» ОНТП 0.04. «Новая техника и технологии в теплоэнергетике», пункт 01.02.01 «Разработка подшипников паровых турбин на водяной смазке в течение 2000–2005 гг.».

6. Разработаны научно-технические предложения, которые легли в основу концепции «Увеличение генерирующей мощности крупных ГЭС», рассмотренной 30.10.2007 г. на заседании секции НТС ОАО «ГидроОГК» по гидротурбинному и гидромеханическому оборудованию.

Реализация работы на практике.

Созданные методы и средства повышения прочности, работоспособности, и долговечности опор скольжения энергетических установок гидравлических и тепловых электростанций позволили решить широкий круг задач по обеспечению прочности, работоспособности и долговечности подпятников гидроагрегатов, ГЭС. Также созданные методы и средства обеспечили резкое увеличение прочности, работоспособности и долговечности радиальных и осевых опор скольжения роторов энергетических установок тепловых электростанций. В том числе:

1. Методы проектирования и расчета упругодеформирующихся радиальных опор скольжения приняты и включены в библиотеку конструктора в справочник «Проектирование деталей из пластмасс»/ М.: Машиностроение. – 1969. – С 167-171.

2. Созданные новые ЭМП опоры скольжения, превосходящие по своим характеристикам отечественные и зарубежные аналоги, установлены и надежно работают без ограничений и без замечаний на всех гидроэлектростанциях бывшего СССР, в том числе на самых крупных ГЭС: Саяно-Шушенской имени П.С. Непорожного, Красноярской, Братской, Усть-Илимской, Волжской ГЭС им. В.И. Ленина (ныне Жигулевской ГЭС), Саратовской, Волжской, Чебоксарской и других, что подтверждено актами внедрения и отзывами самих ГЭС, приведенными в Приложениях к диссертации.

3. Впервые в практике отечественного и зарубежного машиностроения на основе разработанной нами принципиально новой технологии по приказу МИНЭНЕРГО СССР № 211а от 29.09.1981 г. при нашем научном руководстве и личном участии на Чебоксарском опытно-экспериментальном заводе «ЭНЕРГОЗАПЧАСТЬ» создано промышленное производство разработанных нами новых композитных радиальных и осевых ЭМП опор скольжения, превосходящих по своим характеристикам отечественные и зарубежные аналоги. Данное производство работает и в настоящее время, оно поставило ЭМП опоры скольжения на все гидростанции бывшего СССР, многие тепловые электростанции, а также в 35 зарубежных стран на все континенты планеты, что внесло значительный вклад в развитие энергетики и экономики нашей страны и возвысило престиж отечественной науки и техники на международном уровне.

4. Разработанный МОКЦД в окружном и радиальном направлении в самоустанавливающихся ЭМП сегментах использован для реконструкции и восстановления прочности, работоспособности, надежности и долговечности аварийно поврежденного подпятника гидроагрегата № 3 Жигулевской ГЭС и подпятников четырех гидроагрегатов ГЭС-2 «Каскада Кубанских ГЭС» – филиалов ОАО «ГидроОГК».

5. Разработанный МОКЦД в окружном и радиальном направлении использован при определении нового режима торможения вертикальных гидроагрегатов ГЭС: Жигулевской и Саяно-Шушенской, причем пять гидроагрегатов Жигулевской ГЭС уже переведены на новый режим торможения, обеспечивший улучшение экологии, увеличение КПД, снижение затрат на чистку поверхностей статора, ротора и охладителей, на приобретение новых тормозных колодок за счет резкого, в 16 – 30 раз, уменьшения износа тормозных колодок.

6. Разработанные и изготовленные ЭМП опоры скольжения установлены и надежно работают без ремонта и без замечаний более 7 лет в осевом подшипнике турбины ст. № 1 Безьяманской ТЭЦ ОАО «ВоТГК», что подтверждено актом внедрения, приведенном в Приложениях к диссертации.

7. Разработанные и изготовленные крупногабаритные радиальные ЭМП опоры скольжения установлены и надежно работают более 15 лет на тягодутьевых механизмах Сургутской ГРЭС-2 и Нижневартовской ГРЭС

8. Разработанные и изготовленные осевые ЭМП опоры скольжения установлены и надежно работают более 15 лет на 16 циркуляционных насосах Сургутской ГРЭС-2.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы изложены в монографии «Эластогидродинамический расчет деталей машин». – М.: Машиностроение, 1988, докладывались и обсуждались на 21 Всесоюзных и Российских конференциях, на международном научно-техническом симпозиуме «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет» (г. Орёл, Орловский Государственный технический университет, 2006), на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, Самарский Государственный аэрокосмический университет, 2006), на международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трибологии» (г. Самара, Самарский государственный технический университет, 2007).

Результаты диссертационной работы вошли в качестве личного вклада соискателя, как руководителя работы и непосредственного исполнителя, в коллективную работу «Разработка конструкций, освоение производства тяжело нагруженных эластичных металлопластмассовых опор скольжения и широкое их внедрение на гидроагрегатах крупнейших гидроэлектростанций страны», удостоенную Государственной премии СССР в области науки и техники, прошли всестороннюю апробацию.

Частично результаты диссертационной работы включены во Всесоюзный справочник: Альшица И.Я., Анисимов Н.Ф., Благов Б.Н. «Проектирование деталей из пластмасс». – М.: Машиностроение, 1970. – С 44 – 49, и также прошли всестороннюю всесоюзную апробацию.

Частично результаты диссертационной работы вошли в качестве личного вклада диссертанта в материалы экспонатов, представленных на трех Выставках Достижений

Народного Хозяйства СССР, где прошли всестороннюю апробацию, а диссертант был удостоен золотой, серебряной и бронзовой медалей ВДНХ СССР.

Частично результаты диссертационной работы вошли в качестве личного вклада диссертанта в материалы экспонатов на международной выставке «Энергетика – 2000» в г. Москве, на Российской Национальной Выставке в Китайской Народной Республике, Пекин (2006 г.) и 13-й Международной специализированной выставке «Энергетика» в г. Самара (2007 г.), где также прошли всестороннюю апробацию.

Частично результаты диссертационной работы представлены в докладе «Эластоэффект в подшипниках скольжения гидроагрегатов ГЭС» на Третьем Всероссийском совещании гидроэнергетиков (Жигулевск, 2005), где также прошли всестороннюю апробацию.

Частично результаты диссертационной работы вошли в качестве личного вклада диссертанта и представлены в двух статьях в центральном Всероссийском журнале «Трение и смазка в машинах и механизмах». – М.: «Машиностроение-1». – 2008. – №5 и № 8, а также в трех статьях в сборнике трудов Самарского государственного аэрокосмического университета «Вестник СГАУ». – Самара. – 2006, 2007. – Т. 1, Т. 2, где также прошли всестороннюю апробацию, а также в двух статьях в журнале «Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. – Самара. – Т. 3, № 3, – 2007 г., где также прошли апробацию.

Публикации

По теме диссертации опубликованы:

- 1 монография;
- 13 статей в центральных рецензируемых журналах, а также в журналах, определенных Высшей Аттестационной Комиссией в 2008 г.;
- 37 работ в других изданиях;
- 13 авторских свидетельств на изобретения СССР;
- 8 патентов РФ;
- 6 патентов за рубежом.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 9 глав и 42 Приложений (отдельный том на 164 страницах). Работа изложена на 227 страницах машинописного текста, содержит 136 рисунков, 20 таблиц. Библиография включает 88 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сформулирована цель исследования.

В Главе 1 («Обзор состояния вопроса») выполнен анализ работ, посвященных проектированию радиальных (опорных) и осевых (упорных) подшипников скольжения. Рассмотрены работы: Ратнера С.Б., Коднира Д.С., Лойтянского Л.Г., Слёжина И.А., Коровчинского М.Т., Альшица М.В., Анисимова Н.Ф., Благова Б.Н., Кестельмана Н.Я., Кестельмана Г.Н., Семенова А.П., Хрущева М.М., Берковича К.С., Платонова В.Ф., Крагельского И.В., Алисына В.В., Александрова А.Е., Соифера А.М., Дьячкова А.К., Терещенко А.В., Н.Типея, Р.Н. Константинеску, Ал.Ника, Чернавского С.А., Паргина Д.П., Орлова П.И., Домбровского В.В., Чичинадзе А.В.

На основе анализа теоретических работ и опыта эксплуатации гидроагрегатов ГЭС и турбогенераторов тепловых электростанций сделан вывод о том, что авторам не удалось приблизиться к радикальному решению проблемы создания прочных работоспособных и долговечных подшипников скольжения для мощных гидрогенераторов крупных гидроэлектростанций и, тем более, решить проблему применения воды для смазки подшипников скольжения в мощных турбогенераторах тепловых электростанций.

В Главе 2 («Исследование упругодеформирующихся неметаллических подшипников скольжения жидкостного трения») приведены физическая и математическая модели эластогидродинамического эффекта в упругодеформирующихся подшипниках скольжения, рисунок 1, математическая формулировка контактно-гидродинамической задачи, приближенное решение контактно-гидродинамической задачи для цилиндрических круговых поверхностей с малой разницей радиусов кривизны и созданные инженерные методы расчета подшипников скольжения. Приведены результаты экспериментальных исследований упругодеформирующихся неметаллических и ЭМП подшипников скольжения, рисунок 1.

Решение контактно-гидродинамической проблемы в самой общей ее постановке заключается в совместном решении трех взаимозависимых задач:

1. Гидродинамической - для протекающего через зазор смазочного вещества.
2. Контактной - для трущихся поверхностей.
3. Тепловой - для смазочного вещества и трущихся поверхностей.

При решении задачи было принято, что трущиеся поверхности изготовлены из изотропного материала и разделены сплошным слоем изотропной вязкой несжимаемой жидкости. Были рассмотрены динамические уравнения движения вязкой жидкости.

Для упругодеформирующихся подшипников скольжения, представляющих собой упругий слой, лежащий на жестком основании, которое имеет цилиндрическую форму, величина деформации определяется соотношением

$$v(x) = -\frac{4(1-m^2)}{\pi E} \int_a^b p_0(\varepsilon) \ln |\varepsilon - x| d\varepsilon, \quad (1)$$

а толщина смазочного слоя определяется соотношением

$$h(x, z) = h_1(x, z) + v(x, z) - \Delta \quad (2)$$

Опираясь на решение Ф.П. Снеговского, который в 1969 г. доказал отсутствие торцевых утечек в тяжелонагруженных металлических подшипниках скольжения, и учитывая, что в упругодеформирующихся неметаллических подшипниках скольжения поверхности трения значительно деформированы, вполне обоснованно принять, что торцевые утечки смазки в осевом направлении практически ничтожны. Это позволяет упростить уравнения гидродинамической теории смазки, которые принимают вид

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu(U_a + U_b) \frac{h_0 - h}{h^3} - 12 \frac{\mu v_b}{h^3} (x - x_0) \quad (3)$$

$$\rho C_v \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \quad (4)$$

При выполнении решения приняты следующие допущения.

1. Рассматривается плоская гидродинамическая задача и случай плоской деформации при отсутствии сжимаемости смазки.

2. Режим движения принимается установившимся. Предполагается, что отсутствует сближение трущихся поверхностей ($U_y = 0$).

3. Основное решение находится для изотермической задачи, причем расчет производится по среднеинтегральной температуре смазочного слоя, т.е. по среднеинтегральной вязкости. Как известно, под среднеинтегральной вязкостью понимают такую вязкость смазки, которая, будучи постоянной в области трения, обеспечивает те же гидродинамические характеристики, что и в действительности, когда температура в области трения переменная.

4. Предполагается, что жидкость обладает ньютоновскими свойствами и ее вязкость не зависит от давления.

В связи с тем, что в подшипниках скольжения одна из поверхностей неподвижна, система уравнений гидродинамической теории смазки имеет вид

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu_0 U \frac{h_0 - h}{h^3} \quad (5)$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{2\mu U}{c p h h_0} \left[1 + 3 \left(\frac{h - h_0}{h} \right)^2 \right] \quad (6)$$

где μ - вязкость масла; U - скорость скольжения; h_0 - толщина смазочного слоя при максимальном давлении; h - текущее значение толщины смазочного слоя; c - удельная теплоемкость масла; ρ - плотность масла; x - текущая линейная координата; $0 \leq x \leq L$; L - полная длина сечения.

Из рассмотрения формы зазора в упругодеформирующемся подшипнике скольжения, рисунок 1, толщина смазочного слоя определяется соотношением

$$h(\alpha) = \psi r(1 - \cos \alpha) + h_{m1} \cos \alpha + v(\alpha), \quad (7)$$

где h_{m1} - минимальное расстояние между окружностями, измеренное по линии центров;

r, R - радиус цапфы и вкладыша до деформации; $\psi = \frac{R-r}{r}$ - относительный зазор подшипника

скольжения; U - окружная скорость цапфы; e - величина абсолютного эксцентриситета во вкладыше; α - угол (отсчитывается от линии центров цапфы и вкладыша в сторону обратную вращению); α_1, α_2 - углы, соответствующие концу и началу области трения; $v(\alpha)$ - величина деформации; γ - угол между двумя радиусами-векторами, проведенными из центра цапфы к центру вкладыша на одну точку поверхности трения; $h_{вн} = -h_1$ - «внедрение» цапфы во вкладыш; $h_{вн \max} = -h_{m1}$ - величина максимального «внедрения» цапфы во вкладыш.

С целью получения общего решения для широкого диапазона рабочих параметров численные решения задачи производились в безразмерной форме.

Связь размерных и безразмерных параметров определяется в следующем виде:

$$x = r\alpha, \quad (8)$$

$$\rho_0 = \rho r, \quad (9)$$

$$x = B_1 z, \quad (10)$$

$$h = h_0 H. \quad (11)$$

После подстановки значений размерных параметров, выраженных через безразмерные, в уравнение (5) получено

$$\frac{dp}{dz} = \frac{1-H(z)}{H^3(z)}. \quad (12)$$

Используя гипотезу Винклера-Циммермана, получено выражение для прогиба поверхности трения в произвольном сечении

$$v(x) = A \frac{p_0(x)}{E}, \quad (13)$$

где A - коэффициент пропорциональности.

Тогда после перехода к безразмерным параметрам было получено уравнение для безразмерной толщины смазочного слоя в произвольном сечении с учетом деформации упругого вкладыша подшипника скольжения

$$H(z) = 1 + C_1 \left[1 - \frac{\cos\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right)}{\cos\left(a\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right)} \right] + Cp(\alpha) \quad (14)$$

С учетом найденного значения безразмерной толщины смазочного слоя уравнение (12) приняло вид

$$\frac{dp(z)}{dz} = \frac{-Cp - C_1 \left[1 - \frac{\cos\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right)}{\cos\left(a\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right)} \right]}{\left\{ 1 + Cp + C_1 \left[1 - \frac{\cos\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right)}{\cos\left(a\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right)} \right] \right\}^3} \quad (15)$$

Это уравнение решалось на ЭВМ методом Рунге-Кутты. При значении $n = 0$ получено решение для постоянной вязкости масла.

Гидродинамическая грузоподъемность подшипника определяется как сумма проекций гидродинамических давлений на линию центров S_{10} и на перпендикуляр к ней S_{20} , как это видно из рисунка 1.

$$S_{10} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} rp(\alpha) \cos(\alpha) d\alpha \quad (16)$$

$$S_{20} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} rp(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha \quad (17)$$

Составляющие S_{10} и S_{20} выраженные в безразмерной форме имеют вид

$$S_1 = \frac{S_{10}}{rB\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}} = \int_a^b p(z) \cos\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right) dz \quad (18)$$

$$S_2 = \frac{S_{20}}{rB\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}} = \int_a^b p(z) \sin\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right) dz \quad (19)$$

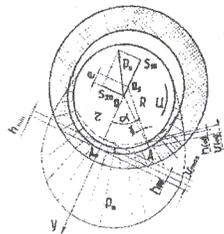


Рисунок 1 – Схема работы упругодеформирующегося подшипника скольжения и определение результирующей гидродинамической грузоподъемности

Тогда безразмерная грузоподъемность определяется по формуле

$$p = \sqrt{\left[\int_a^b p(z) \cos\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right) dz \right]^2 + \left[\int_a^b p(z) \sin\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right) dz \right]^2} \quad (20)$$

Вектор грузоподъемности направлен под углом $\alpha_2 + \varepsilon$ к месту обрыва смазочного слоя

$$\alpha_2 + \varepsilon = a\sqrt{\frac{2}{C_1+1}} + \text{arctg} \frac{\int_a^b p(z) \sin\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right) dz}{\int_a^b p(z) \cos\left(z\sqrt{\frac{2}{C_1+1}}\right) dz} \quad (21)$$

Погонная гидродинамическая грузоподъемность подшипника скольжения в размерной форме определяется по формуле

$$P_0 = rB\sqrt{\frac{2}{C_1+1}} p \quad (22)$$

Полная грузоподъемность подшипника определяется в виде

$$P_1 = P_0 L, \quad (23)$$

где L – длина подшипника.

Было проведено большое количество численных расчетов на ЭВМ для широкого диапазона изменения коэффициентов C и C_1 . На основании этих расчетов были построены номограммы для расчета гидродинамической грузоподъемности, температуры смазочного слоя и толщины смазочного слоя.

В дальнейшем для удобства анализа номограмма для расчета минимальной толщины смазочного слоя была преобразована в формулу, имеющую вид

$$h_{\min} = 1,625 \left(\frac{\delta}{E} \right)^{0,18} \left(\frac{L}{P_1} \right)^{0,44} (\mu_0 U)^{0,62} \frac{r^{0,64}}{\psi^{0,42}} \quad (24)$$

где δ – толщина упругодеформирующегося вкладыша подшипника скольжения; E – модуль упругости; L – длина подшипника, P_1 – полная нагрузка на подшипник, μ_0 – вязкость масла; U – скорость скольжения; r – радиус вала; ψ – относительный зазор.

Примем для упругодеформирующегося и баббитового вкладышей $h_{\min \delta} = h_{\min \delta}$.

Из (24) следует при прочих равных условиях

$$P_{1\delta} = P_{1\delta} (E_\delta / E_\delta)^{0,4}. \quad (25)$$

Так как $E_\delta \gg E_\delta$ то $P_{1\delta} > P_{1\delta}$ и имеет место увеличение грузоподъемности упругодеформирующегося вкладыша по сравнению с жестким баббитовым вкладышем. Это увеличение грузоподъемности мы определяем термином «эластоэффект» в радиальных подшипниках.

Для проверки точности разработанных методов расчета было проведено экспериментальное исследование неметаллических подшипников скольжения жидкостного трения в широком диапазоне рабочих параметров:

1. Нагрузки, действующей на подшипник.
2. Толщины и формы смазочного слоя внутри подшипника, в нагруженной зоне.
3. Температуры смазки на входе и на поверхности трения подшипника, измеряемой методом пленочных термомпар.

4. Гидродинамических давлений, возникающих в смазочном слое.
 5. Момент (коэффициента) трения в подшипнике.
 6. Скоростей скольжения (оборотов вала).
- Результаты экспериментов представлены на рисунках 2, 3, 4, 5.

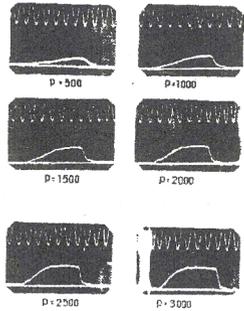


Рисунок 2 – Осциллограммы формы зазора в капроновом подшипнике

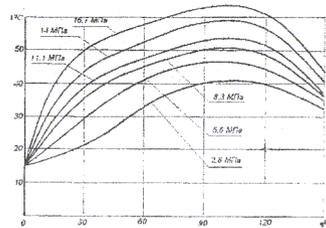


Рисунок 4 – Распределение температуры по дуге окружности в зависимости от удельной нагрузки

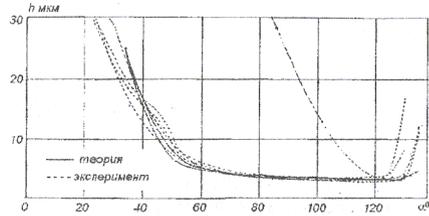


Рисунок 3 – Форма зазора, теоретическая и экспериментальная толщина смазочного слоя в упругодеформирующемся капроновом подшипнике скольжения

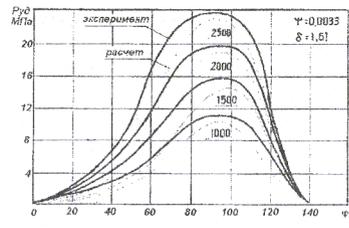
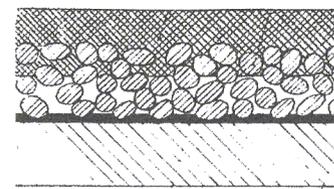


Рисунок 5 – Распределение гидродинамических давлений в неметаллическом подшипнике скольжения

В результате экспериментального исследования было установлено следующее.

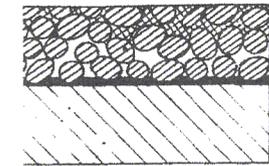
1. Работоспособность и грузоподъемность упругодеформирующихся опор скольжения существенным образом зависят от модуля упругости материала, из которого изготовлены подшипники скольжения.
2. Проектирование упругодеформирующихся подшипников скольжения необходимо выполнять с учетом эластоэффекта.
3. Полученные методы контактно-гидродинамического расчета упругодеформирующихся подшипников обладают достаточной для инженерных методов точностью и позволяют осуществлять проектирование подшипников с учетом эластоэффекта (см. список публикаций, пп. 1-5).

В Главе 3 («Разработка новой конструкции эластичного металлопластмассового подшипника скольжения») отражена разработка новой конструкции ЭМП подшипников скольжения на базе контактно-гидродинамической теории смазки. На рисунке 6 представлена принципиальная конструкция ЭМП подшипника скольжения «закрытого» и «открытого» типа.



закрытого типа

фторопласт
материал МР
припой (клей)
стальной корпус



открытого типа

Рисунок 6 – Структура эластичного металлопластмассового подшипника скольжения

Исследование физико-механических свойств ЭМП опор скольжения показало, что за счет указанных выше факторов можно получать опоры скольжения, различающиеся между собой по модулю упругости в десятки и сотни раз. Это дает возможность создавать работоспособные и долговечные тяжело нагруженные опоры скольжения для роторов энергетических установок.

В Главе 4, п.п. 1, 4, 8, 9, 15-18, 20, 22, 27, 52 («Разработка конструкций эластичных металлопластмассовых опор скольжения для подпятников гидроагрегатов действующих ГЭС») дано обоснование применения ЭМП опор скольжения в подпятниках гидроагрегатов при наличии волнистости зеркала диска пяты, изложено исследование работоспособности и износостойкости ЭМП сегментов подпятника на насосе откачки Волжской ГЭС имени В.И. Ленина [37], описана выполненная конструкторская разработка ЭМП опор скольжения для подпятников гидроагрегатов Волжской ГЭС имени В.И. Ленина, приведено аналитическое обоснование влияния эластоэффекта на работоспособность и макрогеометрию сегментов подпятников гидроагрегатов, приведены результаты выполненных натуральных испытаний ЭМП сегментов в подпятниках насосов откачки Волжской ГЭС им. В.И. Ленина и первых натуральных испытаний опытных крупногабаритных ЭМП сегментов в подпятнике гидроагрегата № 9 Волжской ГЭС им. В.И. Ленина. Кроме того, приведены результаты проведенных натуральных испытаний тяжело нагруженных ЭМП сегментов в подпятнике гидроагрегата № 8 Волжской ГЭС им. В.И. Ленина при удельной нагрузке 10,15 МПа.

На основании анализа эксплуатации, характера и последовательности дефектов, имевших место в баббитовых опорах скольжения Волжской ГЭС имени В.И. Ленина, проведенного Лауреатом Государственной Премии СССР в области науки и техники Александровым А.Е., было сделано следующее заключение, что основной причиной ненадежной работы подпятников гидроагрегатов являются:

- 1) недопустимо высокая неровность (волнистость) зеркальной поверхности диска, достигающая величины 0,35–0,40 мм в зоне наружных сегментов и 0,15–0,20 мм - в зоне внутренних сегментов;
- 2) биение пяты в подпятнике, вызывающее дополнительную динамическую нагрузку на сегменты;
- 3) неравномерное распределение нагрузки по сегментам ряда;
- 4) относительно высокие нагрузки на сегменты в период пуска агрегата.

Качественная картина деформаций и напряжений при волнистости зеркала диска пяты для баббитовой и ЭМП сегмента показана на рисунках 7 и 8.

На основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. ЭМП сегменты подпятников насосов откачки обладают высокой работоспособностью и износостойкостью в условиях частых пусков при удельной нагрузке в период пуска 1,47 МПа.
2. Эластичные сегменты обеспечивают устойчивый режим жидкостного трения при удельной нагрузке 5,39 МПа и скорости скольжения 11,55 м/с при смазке турбинным маслом.
3. Средний износ поверхности трения после наработки 2472 часов и выполнения 3112 пусков имеет величину 8,8–14,4 мкм.

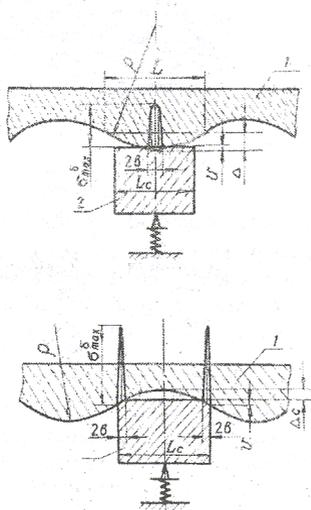


Рисунок 7 – Картина деформаций и напряжений в баббитовом сегменте

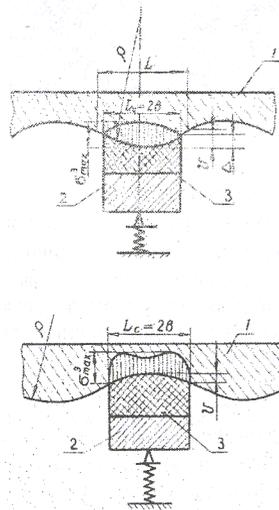


Рисунок 8 – Картина деформаций и напряжений в сегменте с ЭМП покрытием

4. Интенсивность износа после приработки (выполнения 1140 пусков) значительно снижается.
5. Нестабильность геометрии эластичных сегментов в пределах 20–40 мкм не приводит к повреждениям и выходу из строя, т.е. практически не сказывается на работоспособности и надежности подпятника.
6. Качество фторопластовой поверхности трения после выполнения 3112 пусков и наработки 2472 часов практически не ухудшилось.
7. Механическая прочность новой конструкции отвечает требованиям эксплуатации. Нарушения структуры эластичного вкладыша из материала «МР», а также паяного соединения не обнаружено.
8. Нарушения механического соединения фторопластового поверхностного антифрикционного слоя со спрессованными проволочными спиралью не обнаружено.

9. ЭМП опоры скольжения могут применяться в гидроагрегатах Волжской ГЭС им. В.И. Ленина и других машинах, работающих в условиях частых пусков и остановок под нагрузкой.

В подразделах 3.3 и 4.4 диссертации было доказано, что для получения оптимальных конструкций упругодеформирующихся опор скольжения необходимо учитывать влияние эластоэффекта на их гидродинамические характеристики, начальную (исходную) макрогеометрию и координату центра гидродинамических давлений.

Если в период пуска агрегата при наличии волнистости зеркала паты податливость выполняет положительную роль и приводит к снижению контактных напряжений, как показано на рисунках 8 и 9, то в период установившегося движения эта же податливость может привести к отрицательному и нежелательному явлению – снижению гидродинамической грузоподъемности опоры скольжения за счет существенного изменения формы зазора.

Качественный анализ показал, что при начальной геометрии поверхности трения сегмента, выполненной в форме плоскости, на входном участке сегмента в результате деформации образуется расширяющийся зазор, как видно на рисунке 9.

В соответствии с общеизвестными положениями гидродинамической теории смазки при расширяющемся зазоре не могут возникать гидродинамические давления, следовательно,

часть сегмента, прилегающая к зоне расширяющегося зазора не будет нести гидродинамическую нагрузку. Это обстоятельство, в свою очередь, приведет к общему снижению грузоподъемности всего сегмента до уровня, при котором будет неосуществим режим жидкостного трения.

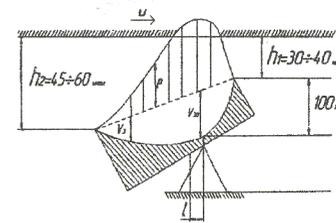


Рисунок 9 – Схема проявления эластоэффекта в ЭМП сегменте подпятника с традиционной макрогеометрией поверхности трения

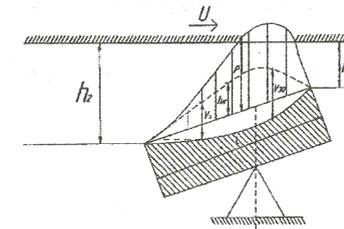


Рисунок 10 – Схема новой, оптимальной макрогеометрии ЭМП сегмента подпятников

Выполненный нами анализ показал, что для устранения отрицательного влияния податливости на гидродинамическую несущую способность в эластичных сегментах подпятников необходимо изменить начальную макрогеометрию сегментов. Это стало возможным за счёт выполнения макрогеометрии ЭМП сегмента в форме выпуклой кривой, форма которой близка к асимметричной параболе, как это показано пунктирной линией на рисунке 10. Причём амплитуда этой кривой относительно плоскости, проходящей через набегающую и сбегающую кромки, показанной штрих-пунктирной линией, определяется величиной упругих деформаций, при которых форма зазора будет представлять сужающийся, возможно нелинейный клин на всей длине сегмента, как это показано на рисунке 10 сплошной линией.

Таким образом, определение начальной макрогеометрии ЭМП сегментов требует знания величин деформаций в каждой из рассматриваемых точек относительно базовой плоскости, показанной на рисунке 10 штрих-пунктирной линией. Иными словами, требовалось решить гидродинамическую задачу с учётом местных деформаций ЭМП сегмента по всей зоне трения.

Сущность решения состояла в определении суммарной несущей способности эластичного сегмента и сравнении её с несущей способностью жёсткого баббитового сегмента. Для решения контактно-гидродинамической задачи была применена общепринятая схема анализа грузоподъёмности плоских самоустанавливающихся сегментов. При этом

$$h_{1Э} = h_{1Б} = h_1; \quad h_{2Э} = h_{2Б} = h_2; \quad h_{хЭ} = h_{хБ} + v_{хЭ}; \quad h_{0Э} = h_{0Б} + v_{0Э}$$

Тогда, с учетом деформаций ЭМП сегмента, которые показаны на рисунке 10, для общего случая формулировки и решения контактно-гидродинамической задачи основные уравнения были получены в следующей форме:

$$\frac{dt^3}{dx} = \frac{2\mu U}{C \cdot \rho (h_{хЭ})^2} = \frac{2\mu U}{C \cdot \rho (h_{хБ} + v_{хЭ})^2}, \quad (26)$$

$$\frac{dp^3}{dx} = 6\mu U \frac{[h_{хБ} + v_{хЭ}] - [h_{0Б} + v_{0Э}]}{[h_{хБ} + v_{хЭ}]^3} \quad (27)$$

где $\mu = \mu_0 f(t)$ - вязкость смазки; h_1 и h_2 - толщины смазочного слоя на сбегающей и набегающей кромках сегмента; $h_{хБ}$, $h_{хЭ}$ - толщина смазочного слоя в произвольном сечении для баббитового и эластичного сегментов; $h_{0Б}$, $h_{0Э}$ - толщина смазочного слоя для баббитового и эластичного сегментов в сечении экстремума

давлений; p^2 - местное давление; U_{x0} - деформация ЭМП покрытия в произвольном сечении; U_{03} - деформация ЭМП покрытия в сечении экстремума давления; U - скорость скольжения; C - теплоёмкость масла; ρ - плотность смазочной среды.

В этом случае местное гидродинамическое давление определяется соотношением

$$p^2 = \frac{6\mu U}{h_{x0}^3} \int_{x_1}^x \frac{[(h_{x0} - h_{0B}) + (v_{x0} - v_{03})]}{\left(1 + \frac{v_{x0}}{h_{x0}}\right)^3} dx \quad (28)$$

Или

$$p^2 = \frac{6\mu U}{h_{x0}^3} \int_{x_1}^x \frac{h - h_0}{\left(1 + \frac{v_{x0}}{h_{x0}}\right)^3} dx + \frac{6\mu U}{h_{x0}^3} \int_{x_1}^x \frac{v_{x0} - v_{03}}{\left(1 + \frac{v_{x0}}{h_{x0}}\right)^3} dx \quad (29)$$

Погонная нагрузка определится соотношением

$$P_0^2 = \int_{x_1}^{x_2} p_x^2 dx. \quad (30)$$

Решение полученной системы уравнений представляет собой сложную задачу, поскольку величина деформаций ЭМП покрытия является функцией гидродинамических давлений, а сами местные давления определяются формой зазора, т.е. деформациями ЭМП покрытия, являющимися функциями гидродинамических давлений.

Вместе с тем, уже на первом этапе разработки и изготовления опытных ЭМП сегментов для мощного гидроагрегата Волжской ГЭС им. В.И. Ленина было важно иметь сопоставление классического решения гидродинамической задачи для жестких самоустанавливающихся сегментов с новым решением, учитывающим деформации ЭМП покрытия, ведущие к изменению формы зазора и, следовательно, к изменению несущей способности ЭМП сегментов. Для оценки изменения несущей способности эластичных металлопластмассовых сегментов был проведен анализ в общей математической форме. Сущность этой оценки заключается в следующем.

Для жесткого, баббитового сегмента деформации покрытия равны нулю. При этом в выражении (29) второй интеграл равен нулю, а знаменатель подынтегральной функции первого интеграла равен единице.

Для эластичного сегмента второй интеграл есть величина отрицательная, так как $v_{03} > v$, а первый интеграл меньше первого интеграла для жесткого баббитового сегмента, так как у него знаменатель подынтегральной функции больше единицы. Таким образом, местные гидродинамические давления в одноименных сечениях для ЭМП сегмента будут меньше соответствующих местных гидродинамических давлений для баббитового сегмента. При этом согласно (30) погонная нагрузка для ЭМП сегмента будет меньше погонной нагрузки для жесткого баббитового сегмента.

Проведенный анализ в общей математической форме без выполнения численных расчетов показал, что податливость ЭМП сегментов при отсутствии степени свободы ротора в осевом направлении приводит к снижению местных гидродинамических давлений (29).

В связи с тем, что в гидроагрегатах ротор обладает степенью свободы в осевом направлении, произойдет уменьшение толщины смазочного слоя до такого значения, что возрастающие местные гидродинамические давления восстановят грузоподъемность в прежнем значении,

которое будем считать предельным для баббитового сегмента. ЭМП сегмент будет работать в режиме гидродинамического трения.

Дальнейшее увеличение осевой нагрузки приведет к дальнейшему уменьшению толщины смазочного слоя. Однако благодаря прекрасным противозадирным свойствам фторопласта надежная работоспособность ЭМП сегментов сохранится. Таким образом, мы можем говорить об увеличении грузоподъемности ЭМП сегментов по сравнению с жесткими, баббитовыми сегментами.

Ранее мы показали, что также имеет место увеличение грузоподъемности радиальных ЭМП подшипников скольжения по сравнению с жесткими баббитовыми. Это свойство увеличения грузоподъемности мы и определяем как эластоэффект.

Податливость определяет также начальную макрогеометрию поверхности трения в окружающем направлении при проектировании ЭМП сегментов для подпятников гидроагрегатов.

Это решение является наиболее точным среди опубликованных в технической литературе, поскольку ни в одной из указанных работ не учитывается влияние эластоэффекта на распределение гидродинамических давлений в окружающем и радиальном направлении.

Таким образом, была создана научная, теоретическая, конструкторско-технологическая и экспериментальная база для проектирования ЭМП сегментов подпятников гидроагрегатов и других машин.

Теоретически начальная макрогеометрия поверхности трения ЭМП сегмента должна быть в форме кривой линии, выпуклая часть которой направлена в сторону зеркала пяты, т.е. быть зеркально отраженной эпюре возникающих деформаций. Однако выполнение такой геометрии на столь крупных сегментах в то время технологически не было освоено.

В связи с этим мы приняли решение аппроксимировать эпюру отраженных деформаций тремя плоскими участками и произвести расчет эпюры гидродинамических давлений на основании общих уравнений гидродинамической теории смазки. С учётом выполненных расчетов уравнение для погонной нагрузки будет иметь вид

$$P_0 = \int_0^{aL} p_I dx + \int_{aL}^{\beta L} p_{II} dx + \int_{\beta L}^L p_{III} dx \quad (31)$$

С достаточной точностью можно предположить, что обрыв смазочного слоя происходит в зоне выходного наклонного участка III при толщине смазочного слоя $h_{III} = h_0$. По найденному h_0 определим параметры интегрирования на третьем участке

$$x_{0III} = \frac{h_0 - H_3}{\theta_2} \quad (32)$$

С учётом найденных h_0 и пределов интегрирования уравнения (31) находим погонную нагрузку P_0 и далее полную несущую способность сегмента

$$P_1 = P_0 B \cdot \zeta \quad (33)$$

ζ — коэффициент, учитывающий конечность ширины сегмента:

$$\zeta = \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_p^2}{B^2}}, \quad (34)$$

где L_p — длина сегмента; B — ширина сегмента.

Координата центра давления X_n определяется соотношением

$$P_0 X_n = \int_0^{a_1} p_1 x dx + \int_{a_1}^{a_2} p_2 x dx + \int_{a_2}^L p_3 x dx \quad (35)$$

Величина деформаций ЭМП покрытия ν определялась в предположении гипотезы Винклера-Циммермана о пропорциональности деформаций действующим нагрузкам:

$$\nu = \frac{p\delta}{E}(1 - m^2), \quad (36)$$

где p – гидродинамическое давление в рассматриваемом сечении, МПа; δ – толщина ЭМП покрытия, м; E – приведённый модуль упругости; m – коэффициент Пуассона.

Безусловно, это было первым приближением решения контактно-гидродинамической задачи для плоских поверхностей и требовалось более точное обобщённое решение. Но это более точное решение требовало дополнительного времени. В крайне острой ситуации, связанной с неудовлетворительной работоспособностью подпятников на гидроагрегатах крупнейших ГЭС (Волжской имени В.И.Ленина, Саратовской, Волгоградской, Плявиньской, Братской, Красноярской и других ГЭС СССР), обладающие теоретические приближенные решения и положительные результаты натурных испытаний ЭМП сегментов на насосе откачке ВоГЭС им. В.И.Ленина позволили нам и руководству ВоГЭС принять смелое по тем временам решение об изготовлении ЭМП сегментов для натурных испытаний в подпятнике гидроагрегата № 9.

На рисунке 11 показаны расчетные эпюры гидродинамических давлений и расчётные формы зазоров в наружном сегменте с новой макрогеометрией.

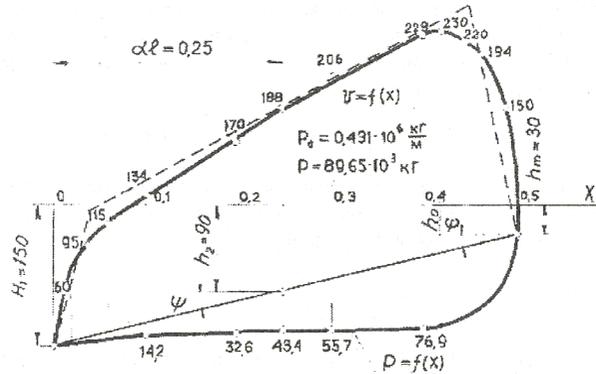


Рисунок 11 - Расчетные эпюры гидродинамических давлений и форма зазора в ЭМП сегменте наружного ряда с новой геометрией и учетом деформаций для подпятника гидроагрегата ст. №9 ВоГЭС имени В.И. Ленина

Изготовленные в соответствии с расчетной макрогеометрией ЭМП сегменты были установлены на гидроагрегат № 9 Волжской ГЭС им. В.И. Ленина, где были проведены всеобъемлющие натурные испытания. Результаты этих натурных испытаний приведены в подразделе 4.4.5 диссертации. Проведенные испытания и опыт безремонтной эксплуатации эластичных металлопластмассовых опор скольжения в подпятнике гидроагрегата № 9 Волжской ГЭС имени В. И. Ленина показали, что применение новых конструкций позволило:

1. Восстановить и обеспечить длительную высокую работоспособность и надежность подпятника гидроагрегата № 9.
2. Снять все ограничения по пускам и режимам работы агрегата в условиях, когда баббитовые серийные сегменты становятся полностью неработоспособными (сплошной грубый задиры и подплавление поверхности трения после выполнения двух-трёх пусков агрегата).

3. Увеличить маневренность гидроагрегата в 40 и более раз. (Эластичные металлопластмассовые опоры скольжения не ограничивают время выстоя агрегата перед последующим пуском, предусмотренного инструкцией по эксплуатации гидроагрегатов).

4. Исключить лавинный процесс повреждения сегментов.
5. Исключить повреждение зеркала диска пяты.
6. Уменьшить потери на трение при пусках в 2,5–3 раза.
7. Уменьшить потери на трение в установившемся режиме работы агрегата.
8. Исключить трудоемкую ручную операцию - шабровку поверхностей трения.
9. Сократить время простоя агрегата в ремонте.
10. Исключить подъем ротора на гидроцилиндрах с последующим его опусканием на подпятник перед пуском агрегата после того, как агрегат не работал более 100 часов.

11. Обеспечить проворот ротора краном во время ремонтов без подъема ротора на гидроцилиндрах и без смазки поверхностей трения органическим жиром (говяжьим салом).

Результаты проведенных исследований показали, что новые эластичные опоры скольжения весьма эффективны в подпятниках гидроагрегатов при удельной нагрузке 5,5 МПа. Аналогичные испытания ЭМП опор скольжения при удельных нагрузках 6,0 МПа были проведены на Саратовской ГЭС, Братской, Усть-Илимской, Плявиньской и Саяно-Шушенской ГЭС. Более того, в дальнейшем нами были проведены натурные испытания в супернагруженных ЭМП сегментах в подпятниках гидроагрегата № 8 Волжской ГЭС им. В.И. Ленина при удельной нагрузке 10,16 МПа и на гидроагрегате № 12 Братской ГЭС при нагрузке 10,6 МПа.

На рисунках 12, 13, 14, 15, 16, 17 приведены определенные в процессе натурных испытаний рабочие параметры супернагруженных сегментов, включающие в себя распределение температур и гидродинамических давлений по поверхности трения испытываемых сегментов и найденную расчетно-экспериментальным путем форму зазора в среднем окружном сечении и радиальном сечении ЭМП сегментов, что показано на рисунках 18 и 19.

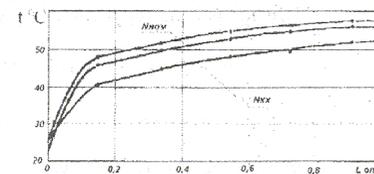


Рисунок 12 – Распределение температуры в среднем окружном сечении ЭМП сегмента № 17 наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина (p = 10,15 МПа)

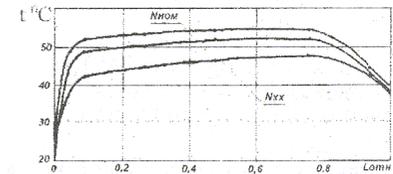


Рисунок 13 – Распределение температуры в среднем окружном сечении ЭМП сегмента № 17 внутреннего ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина (p = 10,15 МПа)

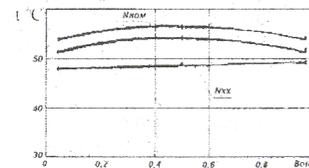


Рисунок 14 - Распределение температуры в радиальном сечении наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина (p = 10,15 МПа)

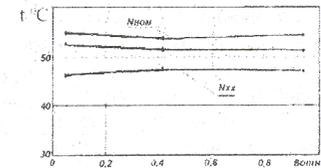


Рисунок 15 - Распределение температуры в радиальном сечении внутреннего ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина (p = 10,15 Па)

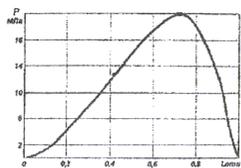


Рисунок 16 – Распределение гидродинамического давления в окружном направлении по среднему радиусу ЭМП сегмента № 15 наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина

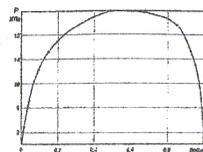
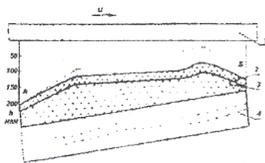
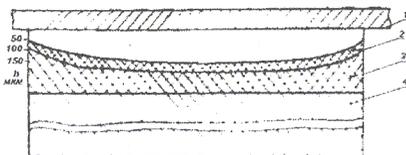


Рисунок 17 – Распределение гидродинамического давления в радиальном сечении сегмента № 15 наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина



Эксцентриситет 11,6 %; удельное давление 10,15 МПа; мощность 115 МВт; АМКБ – исходный профиль; АМ К Б – профиль упругого слоя после нагружения; А – входная кромка сегмента; Б – выходная кромка сегмента; 1 – диск пяты; 2 – фторопластовое покрытие; 3 – упругий материал МР; 4 – стальное основание сегмента

Рисунок 18 – Форма зазора в среднем окружном сечении наружного ЭМП сегмента гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина ($p = 10,15$ МПа)



Эксцентриситет 11,6 %; удельное давление 10,15 МПа; мощность 115 МВт; 1 – диск пяты; 2 – фторопластовое покрытие; 3 – упругий материал МР; 4 – стальное основание сегмента

Рисунок 19 – Форма зазора в радиальном сечении наружного ЭМП сегмента гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина ($p = 10,15$ МПа).

На всех режимах работы гидроагрегата, включая холодные и горячие пуски, а также выбеги ротора без торможения, эластичные сегменты работали надежно более 25 лет.

Проведенные испытания открыли реальную перспективу для проектирования и создания гидроагрегатов нового поколения с единичной мощностью 1 млн. кВт и осевым усилием на подпятник 6000–7000 тс, что подтверждено актами о внедрении.

Дальнейшие численные решения контактногидродинамической задачи были выполнены к.т.н. Ю.И. Байбородовым, к.т.н. В.А. Садыковым, к.т.н. М.И. Курушиным, к.т.н. А.И. Данильченко, к.т.н. А.В. Терещенко, к.т.н. Е.П. Жильниковым, к.т.н. Дьяченко, к.т.н. В.Н. Васиним, к.т.н. А.Н. Тихоновым, к.т.н. В.П. Тукмаковым, к.т.н. М.Я. Савкой, к.т.н. Ю.А. Инциным и другими, подтвердившими справедливость выводов, сделанных в выполненном анализе в общей математической форме уравнения (29).

Следует особо отметить, что теоретическое решение по определению радиальной координаты центра гидродинамических давлений ЭМП сегментов имеет научно-технический приоритет, защищенный патентом РФ № 2262013 от 02.02.2004 г., и подтверждено натурными испытаниями на гидроагрегатах Жигулевской ГЭС, Саяно-Шушенской ГЭС и ГЭС-2 «Каскада Кубанских ГЭС» филиалов ОАО «ГидроОГК», что подтверждено актами о результатах испытаний и технической справкой.

В Главе 5 («Разработка и исследование эластичных опор скольжения для реверсивных подпятников генераторов-двигателей Загорской ГАЭС») приведены разработка конструкции ЭМП сегментов подпятника с нулевым тангенциальным эксцентриситетом для обратимых генераторов-двигателей, а также результаты натурных испытаний, выполненных на гидроагрегате № 5 Усть-Илимской ГЭС.

Разработанные нами конструкции ЭМП сегментов с нулевым эксцентриситетом были заложены в конструкцию подпятников гидроагрегатов Загорской и Кайшадорской ГАЭС, которые работают надежно, без повреждений с 1982 года по настоящее время.

В Главе 6 («Технология изготовления и организация производства эластичных металлопластмассовых сегментов для подпятников гидроагрегатов ГЭС») изложены технология изготовления и организация производства ЭМП сегментов для подпятников гидроагрегатов ГЭС. Разработанная технология была передана нами Чебоксарскому опытно-экспериментальному заводу «Энергозапчасть», где было создано производство ЭМП сегментов.

В Главе 7 («Создание нового промышленного производства и широкое внедрение эластичных металлопластмассовых опор скольжения на крупнейших гидроэлектростанциях мира») представлены материалы о создании по приказу Минэнерго СССР № 211а от 29.09.81 г. при нашем научном руководстве и нашем непосредственном участии первого в мире производства ЭМП опор скольжения. Данное производство работает по настоящее время и поставило ЭМП подпятники скольжения в 35 зарубежных стран.

В Главе 8 («Исследование работоспособности эластичных металлопластмассовых опор скольжения на гидроагрегатах № 6 и № 3 Волжской ГЭС имени В.И. Ленина при повышенной температуре масла в ванне подпятника») приведены результаты натурных испытаний ЭМП сегментов на гидроагрегате № 6 ВоГЭС им. В.И. Ленина при повышенной до +60°C температуре масла в ванне подпятника.

Выполненные исследования позволили нам сделать следующие выводы.

1. ЭМП сегменты обладают высокой надежностью и работоспособностью при температуре масла в ванне подпятника до +60°C.
2. Повышение температуры масла в ванне подпятника до +60°C не оказывает заметного влияния на тепловой режим работы гидрогенератора и охлаждающего его воздуха.
3. Эксплуатация гидроагрегатов Волжской ГЭС имени В.И. Ленина, оснащенных ЭМП опорами скольжения, при температуре масла в ванне +60°C позволяет в 2,6–3 раза уменьшить потери на гидродинамическое трение, по сравнению с обычными условиями эксплуатации (температура масла в ванне подпятника +(28–35)°C).
4. Эксплуатация гидроагрегатов, оснащенных ЭМП опорами скольжения, позволяет уменьшить расход воды из верхнего бьефа на охлаждение подпятника также в 2,6–3 раза при температуре масла в ванне +60°C и увеличить КПД гидроагрегатов на (0,2–0,3) %.
5. Повышение температуры масла в ванне до +60°C и эксплуатация гидроагрегатов Волжской ГЭС им. В.И. Ленина при этой температуре масла дает большой ежегодный экономический эффект (141000 рублей по данным на 1982 год).

В Главе 9 («Исследование динамической напряженности эластичных металлопластмассовых подпятников скольжения») представлены материалы исследования ЭМП опор скольжения на турбозубчатом агрегате при смазке маслом и при смазке водой вместо масла на турбогенераторе К100-90 Славянской ГРЭС и питательном насосе ПЭН-11 Безьямянской ТЭЦ ОАО «Самараэнерго»), дано обоснование применения в теплоэнергетике ЭМП подпятников скольжения, смазываемых водой вместо масла, и приведены результаты натурных испытаний с оценкой динамики ЭМП подпятников скольжения, работающих на мощном турбогенераторе К100-90 Славянской ГРЭС и питательном насосе ПЭН-11 Безьямянской ТЭЦ ОАО «Самараэнерго».

Кроме того, были проведены расчеты по определению мощности потерь на трение в подшипниках, смазываемых маслом ТП-22, и в подшипниках, смазываемых водой.

На рисунках 20 и 21 приведены эпюры гидродинамических давлений, а также графики температуры поверхности трения, потерь мощности на трение при смазке маслом и при смазке водой.

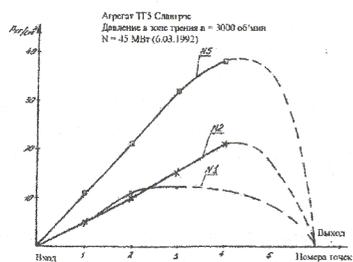


Рисунок 20 – Давление в зоне трения ЭМП подшипников скольжения турбогенератора К100-90 ст. № 5 Славянской ГРЭС

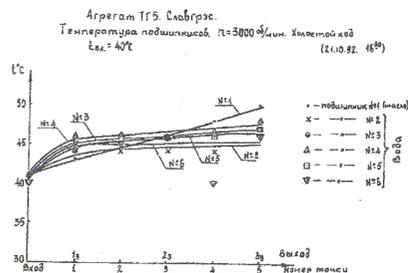


Рисунок 21 – Распределение температуры в ЭМП подшипниках скольжения турбогенератора К100-90 ст. № 5 Славянской ГРЭС

Одновременно в процессе выполненных натурных испытаний проводилось измерение уровней горизонтальных и вертикальных вибраций для всех подшипников, приведенных на рисунке 22, 23.

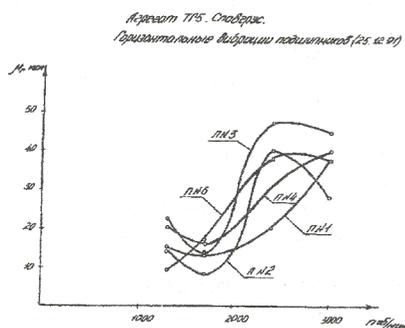


Рисунок 22 – Уровень горизонтальных вибраций в ЭМП подшипниках скольжения турбогенератора К100-90 ст. № 5 Славянской ГРЭС

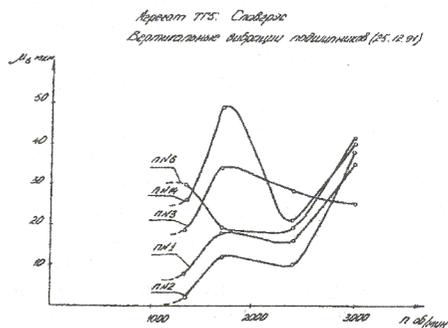


Рисунок 23 – Уровень вертикальных вибраций в ЭМП подшипниках скольжения турбогенератора К100-90 ст. № 5 Славянской ГРЭС

Анализ показывает, что уровень горизонтальных и вертикальных вибраций составляет 35–40 мкм, что не превышает уровня вибраций при работе на баббитовых подшипниках скольжения, смазываемых минеральным маслом. За время натурных испытаний турбогенератор К-100-90 ст. № 5 мощностью 100000 кВт проработал при смазке подшипников скольжения водой более 1200 часов. При этом износ поверхностей трения, связанный с многократными пусками и остановками турбогенератора, предусмотренных программой испытаний, включая выбег без срыва вакуума и со срывом вакуума, оказался менее 0,05 мм, поскольку все мерные базы глубиной 0,05 мм, нанесенные на поверхностях трения в плоскости наибольшей нагрузки, не подверглись полному истиранию.

Таким образом, впервые в мировой практике было доказано экспериментально, что мощные турбогенераторы могут надежно и долговечно работать на крупногабаритных ЭМП подшипниках скольжения, смазываемых водой вместо масла.

Проведенные исследования и натурные испытания дали основание сделать следующие выводы:

1. Полученные результаты длительных натурных испытаний эластичных металлопластмассовых (ЭМП) подшипников скольжения на турбогенераторе К100-90 мощностью 100000 кВт на Славянской ГРЭС и на питательном насосе ПЭН-11 Безымянской ТЭЦ ОАО «Самараэнерго» впервые в мировой практике доказали реальную высокую работоспособность и надежность новых подшипников скольжения, смазываемых водой вместо минеральных и синтетических масел.

2. Высокая работоспособность и надежность ЭМП подшипников скольжения, смазываемых водой, при высоких удельных нагрузках достигаются за счет эластоэффекта, приводящего к изменению формы зазора в зоне трения. Такая форма зазора обеспечивает работу подшипников в условиях чисто жидкостного гидродинамического трения, которое недостижимо в жестких баббитовых подшипниках скольжения, смазываемых столь маловязкой жидкостью, как вода.

3. Уровень горизонтальных и вертикальных вибраций составляет 35–40 мкм, а виброскорость – менее 4,5 мм/с, что удовлетворяет нормам ПТЭ теплотехнического оборудования на существующих тепловых электростанциях России.

4. Переход на смазку подшипников скольжения водой вместо масла приводит к уменьшению потерь мощности на трение в 4–5 раз. Учитывая, что в турбогенераторах, подшипники которых смазываются маслом, потери мощности на трение в подшипниках скольжения составляют 0,2%, уменьшение потерь мощности на трения в 4–5 раз приведет к увеличению КПД турбогенераторов на 0,15–0,18 %.

5. Переход на смазку подшипников скольжения водой вместо масла обеспечит резкое снижение пожароопасности тепловых электростанций.

6. Переход на смазку подшипников скольжения водой значительно улучшит экологию тепловых электростанций.

7. Переход на смазку подшипников скольжения водой вместо масла обеспечит существенное снижение затрат на эксплуатацию за счет исключения расходов на приобретение большого количества минеральных и синтетических масел.

8. Полученные результаты в данной работе имеют научно-технический приоритет, утвержденный патентом на изобретение «Турбогенератор», патент № 2186225 от 07.08.2000 г.

9. Данная работа открыла реальную перспективу создания для тепловых электростанций в России и в мире турбогенераторов нового поколения, работающих без минеральных и синтетических масел.

10. Актуальность проблемы, решаемой в данной работе, подтверждена РАО «ЕЭС России», принявшим решение о расширении данных исследований по программе ОНТП 0.04 «Новая техника и технологии в теплоэнергетике», пункт 01.02.01. «Разработка подшипников паровых турбин на водяной смазке в течение 2000 – 2005 гг.».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена крупная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение для энергетики нашей страны – повышение прочности, работоспособности и долговечности опор скольжения энергетических установок гидравлических и тепловых электростанций, обеспечивающих безаварийную работу подшипников гидроагрегатов ГЭС, увеличение мобильности ГЭС за счет применения новых композитных ЭМП опор скольжения, создаваемых на основе разработанных новых методов расчета и проектирования опор с заданными характеристиками.

1. Проведен обзор существующего состояния вопроса и рассмотрены теоретические и экспериментальные работы ведущих ученых и специалистов, посвященные методам проектиро-

-вания и расчета, а также средствам обеспечения прочности, работоспособности и долговечности опор скольжения.

2. Разработаны модели работы опор скольжения и выполнены исследования динамической напряженности опор скольжения различных конструкций, работающих при пусках и остановках роторов под нагрузкой и в установившемся режиме работы энергетических установок.

3. Разработаны методы проектирования и технологии изготовления опор скольжения повышенной прочности, работоспособности и долговечности. Эти методы заключаются в снижении местных контактных и гидродинамических давлений, обусловленных возросшими удельными нагрузками в существующих и проектирующихся энергетических установках. Это достигнуто путем применения композитных антифрикционных материалов с уменьшенным модулем упругости (увеличенной податливостью), а также посредством создания эластичного металлопластмассового (упругодеформирующегося) антифрикционного покрытия для опор скольжения роторов энергетических установок.

4. Впервые проведены исследования упругодеформирующихся неметаллических подшипников скольжения гидродинамического жидкостного трения, разработана модель их работы, математическая модель для решения контактногидродинамической задачи, созданы методы расчетов, учитывающие влияние упругих деформаций поверхностей трения на форму зазора, несущую способность смазочного слоя и грузоподъемность опор скольжения, их прочность, работоспособность. Проведены экспериментальные исследования с непрерывным по окружности измерением толщины смазочного слоя в зоне трения, гидродинамических давлений и температуры на поверхности трения в локальных точках в окружном направлении, коэффициента трения и сравнительного износа баббитовых и новых ЭМП опор скольжения при динамике запрограммированного по времени изменения частоты вращения при пусках и остановках под нагрузкой. Эти исследования доказали достоверность и точность разработанных на основании контактно-гидродинамической теории смазки методов расчета и проектирования упругодеформирующихся опор скольжения.

5. Впервые получено аналитическое решение эластогидродинамической задачи для плоских поверхностей ЭМП сегментов подпятников, доказавшее в общем виде влияние упругих деформаций поверхностей трения на грузоподъемность и, в связи с этим, необходимость применения новой макрогеометрии ЭМП сегментов, позволяющей обеспечить оптимальную форму зазора при максимальной несущей способности смазочного слоя и исключить возникновение установленного в данной работе отрицательного явления – угловых автоколебаний самоустанавливающихся ЭМП сегментов.

6. Впервые в практике отечественного и зарубежного машиностроения разработаны и созданы конструкции ЭМП опор скольжения с новой макрогеометрией, полученной на основании теоретических расчетов, для подпятников гидроагрегатов действующих ГЭС: Волжской ГЭС им. В.И. Ленина, Саратовской, Братской, Усть-Илимской, Плявиньской, Иркутской, Саяно-Шушенской и Загорской гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС). Проведены их натурные испытания, доказавшие, что по сравнению с традиционно применяющимися баббитовыми опорами скольжения новые ЭМП опоры скольжения обладают более высокой прочностью, работоспособностью и долговечностью при штатных нагрузках и при удельной нагрузке 10 МПа на гидроагрегате № 8 волжской ГЭС им. В.И. Ленина и 10,6 МПа на гидроагрегате № 12 Братской ГЭС, что подтверждено актами внедрения. Научно-технический приоритет новых ЭМП опор скольжения подтвержден пятью авторскими свидетельствами на изобретения СССР. Это уникальное достижение открыло реальную перспективу создания подпятников для сверхмощных гидроагрегатов нового поколения с единичной мощностью 1000 МВт и нагрузкой на подпятник 60–70 МН.

7. Впервые в практике отечественного и зарубежного машиностроения разработана технология изготовления новых радиальных и осевых ЭМП опор скольжения, позволяющая создавать опоры скольжения с наперед заданными на основании расчетов физико-механическими характеристиками, научно-технический приоритет которой подтвержден

двумя авторскими свидетельствами на изобретения СССР, двумя патентами РФ, а также шестью зарубежными патентами. На базе разработанной технологии по приказу МИНЭНЕРГО СССР № 211а от 29.09.1981 г. на Чебоксарском опытно-экспериментальном заводе «ЭНЕРГОЗАП-ЧАСТЬ» создано уникальное промышленное производство радиальных и осевых ЭМП опор скольжения, позволившее оснастить ЭМП опорами скольжения гидроагрегаты всех отечественных и многих зарубежных гидроэлектростанций, а также энергетические установки отечественных тепловых электростанций, что обеспечило радикальное увеличение прочности, работоспособности и долговечности гидроагрегатов, резко увеличило мобильность ГЭС в целом и внесло значительный вклад в развитие энергетики и экономики страны, возвысило престиж отечественной науки и техники на международном уровне. Данное производство работает и в настоящее время и поставило ЭМП опоры скольжения в 35 зарубежных стран.

8. Впервые разработаны конструкции ЭМП сегментов с нулевым эксцентриситетом для реверсивных подпятников генераторов-двигателей Загорской гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС) и проведены их натурные испытания при удельной нагрузке 6,0 МПа, превышающей на 10 % удельные нагрузки, имеющие место в подпятниках самых мощных гидроагрегатов крупнейших отечественных ГЭС. Испытания подтвердили высокую прочность, работоспособность и долговечность новых ЭМП сегментов при неоднократно изменяющейся в течение суток динамике их работы в прямом и реверсивном режимах работы гидроагрегатов, в установившихся режимах работы и, что особенно важно, при резкой динамике нагрузок при пусках и остановках гидроагрегатов, а также позволило упростить конструкцию самих подпятников за счет исключения из проекта сложной, громоздкой, дорогостоящей и недостаточно надежной системы непосредственного впрыска (ПСП).

9. Впервые выполнено исследование работоспособности ЭМП опор скольжения при повышенной температуре масла в ванне подпятника до + 60°C путем проведения теоретических исследований и натурных испытаний на гидроагрегатах ст. № 3 и № 6 Волжской ГЭС им. В.И. Ленина. Выполненное исследование доказало, что новые ЭМП опоры скольжения при указанной температуре масла в ванне подпятника обладают более высокой прочностью, работоспособностью и долговечностью по сравнению с традиционно применяющимися баббитовыми опорами скольжения при длительной работе гидроагрегата и, что особенно важно при резких изменениях нагрузок при пусках и остановках гидроагрегатов. Это достижение открыло весьма важную перспективу увеличения КПД гидроагрегатов за счет резкого уменьшения потерь на трение в подпятниках, что приводит к увеличению генерирующей мощности крупных ГЭС с большим экономическим эффектом. На базе выполненных исследований ОАО «ГидроОГК» в 2007 г. сформулировано новую концепцию отрасли – «Повышение генерирующей мощности крупных ГЭС», рассмотрение которой состоялось 30.10.2007 г. на заседании секции НТС ОАО «ГидроОГК» по гидротурбинному и гидромеханическому оборудованию.

10. Впервые в практике отечественных тепловых электростанций выполнено теоретическое исследование крупногабаритных эластичных металлопластмассовых (ЭМП) опор скольжения при смазке водой вместо масла и экспериментальное исследование путем проведения стендовых и, что особенно важно, натурных испытаний на крупном мощном турбогенераторе К100-90 Славянской ГРЭС. Выполненные исследования показали, что новые ЭМП опоры скольжения при удельной нагрузке 3,5 МПа и при смазке водой обладают высокой прочностью, работоспособностью и долговечностью – как при установившемся режиме турбогенератора, так и при изменяющейся динамической нагрузке при пусках и остановках турбогенератора без срыва и со срывом вакуума. Кроме того проведенные исследования показали, что динамическая вибронапряженность ЭМП опор скольжения, смазываемых водой, находится в пределах установленных правилами технической эксплуатации (ПТЭ) норм для тепловых электростанций.

Достигнутые результаты подтверждены актами натурных испытаний и открыли реальную перспективу реконструкции турбогенераторов и вспомогательного оборудования действующих тепловых электростанций и создания турбогенераторов нового поколения, работающих без применения минеральных горючих масел, что обеспечит резкое снижение пожароопасности, увеличение КПД на (0,15-0,18) %,

улучшение экологии, снижение расходов на приобретение минеральных либо синтетических масел.

Актуальность этой крупной и острой проблемы, решённой в диссертационной работе, подтверждена РАО «ЕЭС России», принявшим решение о расширении данных исследований по утвержденной программе ОНТП 0.04 «Новая техника и технологии в теплоэнергетике» (пункт 01.02.01 «Разработка подшипников паровых турбин на водяной смазке в течение 2000–2005 гг.).

11. Впервые разработаны методы определения координат центра гидродинамических давлений (МОКЦГД) в окружном и радиальном направлении в самоустанавливающихся ЭМП сегментах с учетом податливости ЭМП покрытия, позволяющие проектировать и устанавливать ЭМП сегменты в подпятниках гидроагрегатов с оптимальным окружным и радиальным эксцентриситетом, обеспечивающим наибольшую грузоподъемность, прочность и долговечность за счет исключения перекоса ЭМП сегментов относительно зеркала пяты в радиальной плоскости и создания формы зазора в окружном направлении, обеспечивающей наибольшую несущую способность смазочного слоя и грузоподъемность сегментов. Научно-технический приоритет метода утвержден патентом РФ № 2262013 от 10.10.2005 г.

12. Впервые определена макрогеометрия, разработаны конструкции ЭМП сегментов с датчиками измерения рабочих параметров, изготовлены опытные комплекты ЭМП сегментов для зарубежных ГЭС, в частности для трех крупных ГЭС Китая: Лун-Ян Ся, ГЭ Джоуба, Да Хуа, – и проведены натурные испытания, обеспечившие многочисленные крупные международные контракты на поставку из России уникальных ЭМП опор скольжения, превосходящих все применявшиеся на зарубежных ГЭС опоры скольжения, что, естественно, подтвердило признание престижа отечественной науки и техники на международном уровне.

13. Теоретически и экспериментально определены рациональные режимы торможения роторов вертикальных энергетических установок ГЭС, обеспечивающие работу ЭМП опор скольжения без повреждения при смазке маслом «Турбинное-30» при удельной нагрузке до 6,5 МПа и снижающие износ тормозных колодок в 16–30 раз.

14. Впервые на базе теоретических расчетов с применением способа установки сегментов по патенту РФ № 2262013 и проведенных натурных испытаний на Жигулевской ГЭС в 2008 г. пять гидроагрегатов этой ГЭС переведены на новый режим торможения с включением в работу системы торможения при частоте вращения ротора, составляющей 5 % от номинальной частоты вращения в отличие от штатной частоты вращения, составляющей 20 % от номинальной частоты вращения, что обеспечило резкое уменьшение износа тормозных колодок в 16–30 раз и привело к уменьшению загрязнения помещения подпятника и машинного зала продуктами износа тормозных колодок (улучшение экологии), поверхностей охладителей, статора и ротора, что привело к улучшению охлаждения, повышению КПД, сокращению расходов на очистку гидроагрегатов и на приобретение новых тормозных колодок, что подтверждено технической справкой руководства Жигулевской ГЭС от 06.06.2008 г.

По теме диссертации опубликованы:

- 1 монография:

1 Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчет деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 159 с.

- 13 статей в рецензируемых центральных журналах, в том числе 7 статей за последние два года в журналах, определенных Высшей Аттестационной Комиссией:

2 Байбородов Ю.И. Измерение температуры смазки неметаллического подшипника скольжения // Вестник машиностроения. - 1965. - № 1. – С. 45–47.

3 Коднир Д.С., Байбородов Ю.И. Экспериментальное определение толщины смазочного слоя, давлений и коэффициента трения в неметаллических подшипниках скольжения // Вестник машиностроения. - 1965. - № 12. – С. 41–44.

4 Соيفер А.М., Коднир Д.С., Байбородов Ю.И. Эластичный подшипник скольжения на основе упругодемпфирующего материала «МР» в сочетании с фторопластом // Известия высших учебных заведений. - М.: Машиностроение. - 1965. - № 7. – С. 67–69.

5 Коднир Д.С., Байбородов Ю.И. Контакт-гидродинамический расчет неметаллических подшипников скольжения жидкостного трения // Вестник машиностроения. –1968–№3.–С.65–72.

6 Опыт эксплуатации металлопластмассовых сегментов в подпятнике гидроагрегата № 9 Волжской ГЭС им. В.И. Ленина/ Ю.И.Байбородов, А.А. Романов, А.В. Терещенко и др.// Гидротехническое строительство. – 1977. - № 10. – С. 72–82.

7 Исследование служебных свойств металлопластмассовых сегментов в подпятнике гидроагрегата № 5 Братской ГЭС/ Ю.И.Байбородов, А.Е. Александров, А.В. Терещенко и др.// Гидротехническое строительство. – 1982. - № 4. – С. 55 – 61.

8 Байбородов Ю.И., Индин Ю.А. Исследование вибронпряженности эластичных металлопластмассовых подшипников скольжения при смазке водой на турбогенераторе К100-90 Славянской ГРЭС и питательном насосе ПЭН-11 Безымянской ТЭЦ ОАО «Самарэнерго» / – Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. - 2006. – С. 277–281.

9 Байбородов Ю.И. Определение износа эластичных металлопластмассовых и баббитовых подшипников скольжения в условиях частых пусков и остановов// Известия самарского научного центра РАН / Самара. – 2007. – Т.9, № 3. – С. 712–715.

10 Байбородов Ю.И., Индин Ю.А. Расчет радиальной координаты центра гидродинамических давлений в самоустанавливающихся эластичных металлопластмассовых сегментах подпятников с учетом податливости покрытия// Известия самарского научного центра РАН / Самара. – 2007. – Т.9, № 3. – С. 716–725.

11 Байбородов Ю.И. Создание эластичных металлопластмассовых подпятников для обратимых гидрогенераторов гидроаккумулирующих станций// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. - № 3 за 2007. – С. 116 – 118.

12 Байбородов Ю.И. Натурные испытания супернагруженных подпятников для гидрогенераторов нового поколения Сибирских ГЭС с единичной мощностью 1 миллион кВт// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. - № 1 за 2008. –С. 112 – 121.

13 Байбородов Ю.И. Натурные испытания эластичных металлопластмассовых сегментов тяжело нагруженных подпятников гидроагрегатов ГЭС// Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение. - 2008. - № 5. – С. 78 – 85.

14. Байбородов Ю.И., Индин Ю.А. Динамика износа тормозных колодок мощных гидроагрегатов крупных ГЭС.// Трение, смазка в машинах и механизмах./ М.: Машиностроение. – 2008. - № 8. – С. 3–8.

- 37 работ в других изданиях:

15 Байбородов Ю.И., Коднир Д.С. Разработка и экспериментальное исследование металлопластмассовых эластичных подшипников скольжения // Труды III Всесоюзной научно-технической конференции по применению полимерных материалов в машиностроении, НИИМАШ. Полимеры в машинах. С-IX. Новые материалы в машиностроении. – 1966.

16 Байбородов Ю.И. Контакт-гидродинамический расчет неметаллических подшипников скольжения// Тезисы докладов. – Труды КуАИ. № 23. – 1965. – С. 21 – 22.

17 Байбородов Ю.И. Экспериментальное исследование неметаллических подшипников// Тезисы докладов/ Труды КуАИ. № 23. – 1965. – С. 59 – 71.

18 Байбородов Ю.И. Преобразование номограммы в формулу для расчета толщины смазочного слоя// Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции/ Куйбыш. авиац. ин-г. – 1976. – С. 21 – 22.

19 Байбородов Ю.И. Шумоглушающий металлопластмассовый подшипник скольжения// Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1976.

20 Байбородов Ю.И. Определение износа баббитовых и эластичных подшипников скольжения методом искусственных баз// Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1976. – С. 51–52.

21 Байбородов Ю.И., Покровский И.Б., Кондрашин Г.И. Исследование стабильности геометрических параметров материала вкладышей эластичных подшипников// Сборник трудов/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1976. – № 40. – С. 35–38.

22 Байбородов Ю.И. Определение износа баббитовых и эластичных подшипников скольжения методом искусственных баз// Научно-техническое совещание по методам испытания и оценки служебных свойств материалов для подшипников скольжения/ М. – ИИМАШ. – 1969. – С. 58–60.

23 Байбородов Ю.И., Котов В.А., Селивановский Ю.М. Акустическая эффективность эластичных металлопластмассовых подшипников// Материалы научно-технической конференции/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1970. – С. 31–32.

24 Байбородов Ю.И., Покровский И.Б. Исследование стабильности геометрических размеров эластичных металлопластмассовых подшипников// Материалы научно-технической конференции/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1970. – С. 68–69.

25 Байбородов Ю.И., Покровский И.Б. Исследование прочности клевого соединения вкладышей// Материалы научно-технической конференции/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1970. – С. 63–64.

26 Байбородов Ю.И., Покровский И.Б. Экспериментальная установка для исследования высокоскоростных эластичных подшипников скольжения// Кинематика и динамика механизмов летательных аппаратов. Сборник трудов/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1972. – С. 78–79.

27 Байбородов Ю.И., Савинов А.П. Исследование работоспособности эластичных подшипников в редукторе// Труды I Всероссийской конференции «Контактная гидродинамическая теория смазки и её применение в технике»/ КуАИ. – 1976. – С. 35–37.

28 Исследование работоспособности и износостойкости МР-фторопластовых эластичных сегментов в подпятниках на насосе откачки Волжской ГЭС им. В.И. Ленина Ю.И. Байбородов, А.В. Терещенко, И.Б. Покровский и др.// Межвузовский сборник «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1975. – Вып. 1(68). – С. 95–99.

29 Байбородов Ю.И. Эластичные опоры скольжения// Проспект/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1975.

30 Определение податливости и стабильности геометрических размеров эластичных металлопластмассовых сегментов подпятника насоса откачки Волжской ГЭС им. В.И. Ленина Ю.И. Байбородов, В.И. Дятлов, А.В. Терещенко и др.// Труды II Всесоюзной конференции «Контактногидродинамическая теория смазки»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1976. – С. 94–100.

31 Пути повышения гидродинамической грузоподъемности эластичных металлопластмассовых сегментов. Ю.И. Байбородов, Д.С. Коднир, А.В. Терещенко и др.// Труды Всесоюзной конференции «Трение и износ в машинах»/ Челябинский политехн. ин-т. – 1979. – С. 31–42.

32 Байбородов Ю.И., Терещенко А.В. Гидродинамика центрально опёртой подушки подпятника с плоскими наклонными срезами по её краям// Труды Всесоюзной конференции «Трение и износ в машинах»/ Челябинский политехн. ин-т. – 1979. – С. 75–82.

33 Сравнительная оценка упругих характеристик эластичного металлопластмассового покрытия для сегментов подпятников сверхмощных гидроагрегатов проектируемых ГЭС Сибири. Ю.И. Байбородов, А.Н. Ежов, В.П. Тукмаков и др.// Труды III Всесоюзной конференции «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1981. – С. 91–94.

34 Разработка и исследование тяжело нагруженных ЭМП сегментов с нулевым эксцентриситетом для обратных гидроагрегатов Загорской ГАЭС. Ю.И. Байбородов, А.В. Терещенко, В.П. Тукмаков и др.// Труды III Всесоюзной конференции «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1981. – С. 19–24.

35 **Натурные** испытания тяжело нагруженных металлопластмассовых сегментов. Ю.И. Байбородов, Д.С. Коднир, А.В. Терещенко и др.// Всесоюзная научная конференция «Трение и смазка в машинах»/ Куйбыш. политехн. ин-т. – 1984. – С. 54–62.

36 Экспериментальное исследование изменения температуры по толщине металлопластмассового сегмента подпятника. Ю.И. Байбородов, Д.С. Кондир, А.В. Терещенко и др.// Всесоюзная научная конференция «Трение и смазка в машинах»/ Куйбыш. политехн. ин-т. – 1984. – С. 36–40.

37 Уменьшение потерь мощности на трение в подпятниках гидроагрегатов Волжской ГЭС имени В.И. Ленина. Ю.И. Байбородов, А.А. Романов, В.П. Тукмаков и др.// 4-я Всесоюзная конференция «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1986. – С. 48–50.

38 Исследование эластичных опор скольжения вертикального насоса на водяной смазке. Байбородов, В.П. Тукмаков, В.Н. Жаринов и др.// 4-я Всесоюзная конференция «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1986. – С. 32–33.

39 Байбородов Ю.И. Опыт создания эластичных металлопластмассовых сегментов подпятников гидроагрегатов Саяно-Шушенской и Майнской ГЭС.// Всесоюзное совещание по строительству Саяно-Шушенского гидроэнергетического комплекса/ Ленинград. – 1986. – С. 19–23.

40 Разработка конструкции металлопластмассовых сегментов для реверсивного подпятника генератора-двигателя Загорской ГАЭС и проведение их натурных испытаний. Ю.И. Байбородов, Г.М. Жерносеков, В.В. Лунг// 5-я Всесоюзная конференция «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1991. – С. 25–30.

41 Исследование служебных свойств ЭМП сегментов в подпятнике гидроагрегата № 3 ГЭС Лун-Ян-Ся КНР при исключении автономного охлаждения корпусов сегментов и систем непосредственного впрыска. Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, Лю-Пин-И и др.// 5-я Всесоюзная конференция «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1991. – С. 125–20.

42 Экспериментальное исследование быстроходного эластичного металлопластмассового подшипника при смазке водой. Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, Г.М. Жерносеков и др.// 5-я Всесоюзная конференция «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1991. – С. 41–42.

43 Анализ влияния некоторых плавноизменяющихся форм начальной геометрии эластичных металлопластмассовых сегментов на несущую способность смазочного слоя. Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, Г.М. Жерносеков и др.// 5-я Всесоюзная конференция «Контактная гидродинамика»/ Куйбыш. авиац. ин-т. – 1991. – С. 35–37.

44 Испытания крупногабаритных эластичных металлопластмассовых опор скольжения, смазываемых водой, на турбогенераторе мощностью 100000 кВт на Славянской ГРЭС Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, Г.М. Жерносеков и др.// Российский симпозиум по трибологии с международным участием/ Совет по трению и смазке РАН. – Самара. – 1993. – С. 28–32.

45 Байбородов Ю.И., Жерносеков Г.М., Инцин Ю.А. Измерение гидродинамических параметров в зоне трения ЭМП подшипников скольжения гидротурбин.// Всероссийская научно-практическая конференция «Гидропривод, проблемы использования конверсионных разработок в Машиностроении»/ ГК РФ по высшему образованию. СГАУ. ГПСО «Импульс». – Самара. – 1994. – С. 35–37.

46 Экспериментальное исследование радиального подшипника с эластометаллопластмассовым покрытием на водяной смазке. Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, А.Е. Языков и др.// Всероссийская научно-практическая конференция «Техническая эксплуатация, надежность и совершенствование автомобилей/ ГК РФ по высшему образованию. Челябинский гос. техн. ун-тет. – Челябинск. – 1996. – С. 39–45.

47 Опыт эксплуатации эластичных подшипников скольжения, смазываемых водой на насосах Безьямьинской ТЭЦ. Ю.И. Байбородов, Н.П. Милотин, В.Г. Орехов и др.// Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти акад. Н.Д. Кузнецова/ Самарск. гос. аэрокосм. ун-тет. – 2001. – С. 27–29.

48 Байбородов Ю.И. Эластоэффект в подшипниках скольжения// Труды международного симпозиума «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет»/ М.: Машиностроение-1. – Орловский гос. техн. ун-тет. – 2006. – С. 182–200.

49 Байбородов Ю.И. Аналитическое обоснование влияния эластоэффекта на пусковую, режимную работоспособность и макрогеометрию сегментов подпятников гидроагрегатов// Труды международного симпозиума «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет»/ М.: Машиностроение-1. - Орловский гос. техн. ун-тет. - 2006. – С. 201 – 213.

50 Байбородов Ю.И. Аналитическое обоснование пусковой и режимной работоспособности эластичных металлопластмассовых сегментов подпятников мощных генераторов ГЭС// Труды международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трибологии»/ Самарский гос. техн. ун-тет. – 2007. Т.2. – С. 39 – 48.

51 Экспериментальное исследование турбинного радиального подшипника с эластометаллопластовым (ЭМП) покрытием на водяной смазке. Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, А.Е. Языков и др.// Сборник научных трудов «Повышение надежности и эффективности работы тепломеханического оборудования ТЭС»/ ОАО «Инженерный центр энергетики Урала». Филiaal «Урал-ВТИ-Челябэнергосеть-проект». – Челябинск: Цицеро. - 2005. - С. 224–229.

- 13 авторских свидетельств СССР:

52 А.С. 186225 (СССР) кл. 47в, 9 МПК F06C «Трёхслойный подшипник скольжения»/А.М. Сойфер, Д.С. Коднир, Ю.И. Байбородов; заявлено 22.12.63, опубл. 12.09.66 Бюл 18 за 1966 г.

53 А.С. 193230 (СССР) Кл. 47в МПК F06C «Вкладыш подшипника скольжения»/ Ю.И. Байбородов, заявлено 10.10.66, опубл. 12.09.69.

54 А.С. 273081 (СССР) (51) М. Кл.2F16C 17/08 «Подпятник»/Ю.И.Байбородов, А.И., Данильченко, 1315349/25-27; заявлено 31.03.69, опубл. 15.11.79 Бюл 42 за 1979 г.

55 А.С. 354185 (СССР) кл. 47в, 9 МПК F06C «Опора скольжения» / Ю.И. Байбородов, заявлено 02.11.70, опубл. 09.10.72 Бюл 30 за 1972 г.

56 А.С. 359448 (СССР) М. Кл F16C 17/08 «Подшипник скольжения» / Ю.И. Байбородов, опубл. Бюл 35 за 1972 г.

57 А.С. 649898 (СССР) (51) М. Кл.2 F16C 17/08 «Упругий самоустанавливающийся сегмент подшипника» / Д.С. Коднир, Ю.И. Байбородов, А.В. Терещенко и др., заявлено 22.12.76 опубл. 28.02.79. Бюл 8 за 1979 г.

58 А.С. 684191 (СССР) (51) М. Кл.2 F16C 33/04 «Сегмент подшипника скольжения» / А.В. Терещенко, Ю.И. Байбородов и др., заявлено 15.03.78, опубл. 05.05.79. Бюл 33 за 1979г.

59 А.С. 826114 (СССР) (51) М. Кл.3 F16C 17/06 «Реверсивный подпятник скольжения» / Ю.И. Байбородов., заявлено 22.12.76, опубл. 30.04.81. Бюл 16 за 1981 г.

60 А.С. 863917 (СССР) (51) М. Кл.3 F16D 13/56 «Фрикционная дисковая передача» / Ю.И. Байбородов., заявлено 27.03.79 (21) 2740769/25-27, опубл. 15.09.81. Бюл 34 за 1981г.

61 А.С. 1321958 (СССР) А1 (51) М. F16C 32/12, 27/02 «Способ изготовления упругодемпфирующего антифрикционного покрытия подпятника» / Ю.И. Байбородов, А.Н. Ежов, Д.С. Коднир и др., заявлено 31.03.83 (21) 3571448/25-27, опубл. 07.07.87 Бюл 25 за 1987 г.

62 А.С. 1352103 (СССР) А1 (51) М. F16C 32/12, 27/02 «Способ изготовления упругодемпфирующего антифрикционного покрытия подпятника» / Ю.И. Байбородов, Е.В. Литвинов, Ю.А. Маненков и др., заявлено 19.04.83 (21) 3585206/25-27, опубл. 15.11.87 Бюл 42 за 1987 г.

63 А.С. 1484991 (СССР) (51) М. Кл.2 F16C 33/04 «Сегмент радиального подшипника скольжения» / Ю.И. Байбородов, В.П. Тукмаков, В.А. Морсков и др., заявлено 24.02.87 (21) 4244498/31-27, опубл. 07.06.89. Бюл 21 за 1989 г.

64 А.С. 1612682 (СССР) СО (51) 5 F16C, 17/06 «Подпятник» / Ю.И. Байбородов, заявлено 09.10.88 (21) 4483498/27, опубл. 03.04.94. Бюл 15 за 1994 г.

65 А.С. 1767624 (СССР) А1 (51) 5 Н02 К 5/16, «Гидрогенератор» / Ю.И. Байбородов, Г.М. Жерносеков, А.Н. Ежов и др., заявлено 14.11.89 (21) 4758780/07, опубл. 07.10.92 Бюл 37 за 1992 г.

- 9 патентов Российской Федерации:

66 Патент 1612682 СО (51) 5 F16C 17/06, «Подпятник» / Ю.И. Байбородов, заявлено 09.10.88 (21) 4483498/27, опубл. 03.94 Бюл 15 за 1994 г.

67 Патент 2119600 (13) С1 (51) 6 F16C 27/02, «Способ изготовления упругодемпфирующего антифрикционного покрытия опорных и упорных подшипников скольжения» / Ю.И. Байбородов, В.А. Морсков, Ч.М. Шлепнев, заявлено 04.01.94 94011398/28, опубл. 27.09.98.

68 Патент 2144727 С1 (51) 7 Н02К 5/16, Н02 К 7/102 «Гидрогенератор» / Ю.И. Байбородов, А.А. Романов, Ю.А. Инцин, заявлено 11.10.98 98120320/09, опубл. 20.01.2000.

69 Патент 2161730 С2 (51) 7 F03В 11/06, Н02 К 5/16 «Гидрогенератор» / Ю.И. Байбородов, А.А. Романов, Ю.А. Инцин, заявлено 11.10.98, опубл. 10.01.2001.

70 Патент 2171006 С1 (51) 7 Н02К 5/16, Н02 К 5/00 «Гидрогенератор горизонтальный» / Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, Б.Б. Богущ, А.Д. Гилев, заявлено 22.12.99, опубл. 20.07.2001.

71 Патент 2186225 С2 (51) 7 F01D 25/18 «Турбогенератор» / Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, Н.П. Милотин, В.В. Дикоп, В.Г. Орехов, заявлено 07.08.2000, опубл. 27.07.2002.

72 Патент 2194890 С2 (51) 7 F16C 27/02 F16C17/00, F16C 33/12 «Способ изготовления радиальных упругодемпфирующих подшипников скольжения» / Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, заявлено 13.03.2000 г. 2000106190/28, опубл. 20.12.2002.

73 Патент 2262013 С1 (51) 7 F16C 17/08 «Способ установки сегментов в подпятниках гидроагрегатов» / Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин, В.А.Хуртин, А.В. Игнатушин, Д.А. Борисов, заявлено 02.02.2004 г. 2004103011/11, опубл. 10.10.2005.

74 Патент 2301363 МПК F16C 17/08 F16C 27/08 «Быстроходный подпятник»/ Ю.И. Байбородов, Д.К. Назаренко, В.Г. Орехов, опубл. 2007 Бюлл.№ 17.

- 6 патентов за рубежом:

75 Патент 477003 США, А1 (51) МКИ F16C 33/34. Способ изготовления вкладыша с демпфирующим антифрикционным покрытием для опор скольжения/ Ю.И. Байбородов, В.А. Морсков, Е.В. Литвинов и др. – PCT/SU 8500063; Заявлено 30.07.85; опубл. 12.02.87. WO 87/00894.

76 Патент 850725 Бразилия, А1 (51) МКИ F16C 33/34. Способ изготовления вкладыша с демпфирующим антифрикционным покрытием для опор скольжения/ Ю.И. Байбородов, В.А. Морсков, Е.В. Литвинов и др. – PCT/SU 8500063; Заявлено 30.07.85; опубл. 12.02.87. WO 87/00894.

77 Патент 234872 Аргентина, А1 (51) МКИ F16C 33/34. Способ изготовления вкладыша с демпфирующим антифрикционным покрытием для опор скольжения/ Ю.И. Байбородов, В.А. Морсков, Е.В. Литвинов и др. – PCT/SU 8500063; Заявлено 30.07.85; опубл. 12.02.87. WO 87/00894.

78 Патент 1204198 Италия, А1 (51) МКИ F16C 33/34. Способ изготовления вкладыша с демпфирующим антифрикционным покрытием для опор скольжения/ Ю.И. Байбородов, В.А. Морсков, Е.В. Литвинов и др. – PCT/SU 8500063; Заявлено 30.07.85; опубл. 12.02.87. WO 87/00894.

79 Патент 2188106 Великобритания, А1 (51) МКИ F16C 33/34. Способ изготовления вкладыша с демпфирующим антифрикционным покрытием для опор скольжения/ Ю.И. Байбородов, В.А. Морсков, Е.В. Литвинов и др. – PCT/SU 8500063; Заявлено 30.07.85; опубл. 12.02.87. WO 87/00894.

80 Патент 263612 ЧССР, А1 (51) МКИ F16C 33/34. Способ изготовления вкладыша с демпфирующим антифрикционным покрытием для опор скольжения/ Ю.И. Байбородов, В.А. Морсков, Е.В. Литвинов и др. – PCT/SU 8500063; Заявлено 30.07.85; опубл. 12.02.87. WO 87/00894.

Личный вклад:

- в монографии автором получены научные результаты в области разработки методики контактно-гидродинамического расчета при большой разности радиусов кривизны, методов экспериментального исследования, расчета толщины смазочного слоя в ЭМП подшипника

скольжения, расчета толщины смазочного слоя в эластичных подшипниках скольжения при смазке водой вместо масла, расчета толщины смазочного слоя в эластичных подпятниках, разработки новых конструкций эластичных подшипников и подпятников скольжения из композиционных материалов, разработки технологии изготовления опор скольжения из композиционных материалов, получены результаты экспериментальных исследований и внедрений, сформулированы преимущества и перспективы применения новых конструкций опор;

- в работе 3 автором выполнено экспериментальное исследование толщины смазочного слоя, давлений и коэффициента трения в неметаллических подшипниках скольжения, обработка результатов испытаний;

- в работе 4 автором разработана конструкция эластичного подшипника, создана физическая модель работы ЭМП подшипника скольжения при перекосе вала, разработана технология изготовления;

- в работе 5 автором выполнен контактно-гидродинамический расчет;

- в работе 6 автором разработаны конструкции ЭМП сегментов, программы испытаний, осуществлено руководство и личное участие в проведении испытаний, обработка результатов испытаний;

- в работе 7 автором разработана конструкция опытных ЭМП сегментов, осуществлено научное руководство и личное участие в проведении испытаний;

- в работе 8 автором разработаны конструкции эластичных металлопластмассовых подшипников скольжения, программы испытаний, осуществлено научное руководство и личное участие в проведении испытаний;

- в работе 10 автором дана физическая модель возникновения формы зазора в окружном направлении и расчет центра гидродинамических давлений;

- в работах 14-51 автором лично выполнены разработка конструкций опытных радиальных и осевых подшипников скольжения, программ испытаний, научное руководство и личное участие в проведении испытаний;

- в работах 52-80 автору принадлежат идеи: новых конструкций опор скольжения для гидроагрегатов и способов изготовления этих опор, установки их в подпятниках, методов их расчета, новых способов торможения гидроагрегатов, новой конструкции турбогенератора, работающего на смазке подшипников водой вместо масла.