

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 218.010.02 на базе федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
по диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук
аттестационное дело №

решение диссертационного совета №4 от 23.10.2015 г.

О присуждении Мукутадзе Мурману Александровичу, гражданину РФ, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки» по специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах» принята к защите 03 июля 2015 г., протокол № 2 диссертационным советом Д 218.010.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», РОСЖЕЛДОР, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, приказ № 714/нк от 02.11.2012 о создании диссертационного совета.

Соискатель Мукутадзе Мурман Александрович, 1963 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Неоднородный пористый подшипник переменной толщины и конечной длины с подачей смазки через поры вкладыша» защитил в 1995 году в диссертационном совете Д 063.27.03, созданном на базе Донского государственного технического университета. Работает доцентом на кафедре «Высшая математика» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО РГУПС), РОСЖЕЛДОР, с 1993 г. по настоящее время.

Диссертация выполнена на кафедре «Высшая математика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», РОСЖЕЛДОР.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Ахвердиев Камил Самедович, заведующий кафедрой «Высшая математика» ФГБОУ ВПО РГУПС, заслуженный деятель наук РФ.

Официальные оппоненты: Захаров Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отделения «Транспортное материаловедение» ОАО «ВНИИЖТ»; Рождественский Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей» Южно-Уральского государственного университета, научный руководитель вузовско-академической лаборатории «Триботехника»; Памфилов Евгений Анатольевич – заслуженный деятель наук РФ доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ ВПО «Брянского государственного технического университета», – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук (ИМАШ РАН) (г. Москва), в своем положительном заключении, подписанным Албагачиевым Али Юсуповичем, доктором технических наук, профессором, заведующим лабораторией узлов трения для экстремальных условий, Буяновским

Ильей Александровичем, доктором технических наук, профессором, заведующим лабораторией «Метод смазки машин», указала, что диссертация Мукутадзе М.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой, на основе развития методологии применения автомодельной переменной, разработана система универсальных расчетных моделей подшипников скольжения, одновременно описывающих различные аспекты целого класса трибосистем, работающих на неньютоновских смазочных материалах. Соискатель Мукутадзе М.А. заслуживает присвоение ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04.

Соискатель имеет 88 опубликованных работ, все по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 49. В публикациях рассмотрены вопросы исследования, расчета, оптимизации и перспективного применения новых высокоэффективных смазочных материалов в гидродинамических трибосистемах различной конструкции и условий эксплуатации. Показано, что использование многофакторных моделей с учетом реологии смазочных сред позволяет при реализации повысить демпфирующую и несущую способность подшипников при значительном снижении потерь на трение. Основные работы:

1. Мукутадзе, М.А. Математическая модель сжимаемой микрополярной гидродинамической смазки радиального подшипника с адаптированным профилем его опорной поверхности / М.А. Мукутадзе // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 8 (59). – С. 1400–1404.

2. Мукутадзе, М.А. Гидродинамический расчет радиального подшипника с адаптированным профилем опорной поверхности / М.А. Мукутадзе // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 1(165). – С. 95–97.

3. Мукутадзе, М.А. Математическая модель гидродинамической смазки упорного подшипника, работающего на сжимаемой смазке с расплавом / М.А. Мукутадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1(45). – С. 196–200.

4. Мукутадзе, М.А. Гидродинамический расчет упорного подшипника с адаптированным профилем опорной поверхности, работающего на сжимаемой вязкоупругой смазке / М.А. Мукутадзе // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 5. – С. 19–22.

5. Мукутадзе, М.А. Расчетная модель с учетом зависимости вязкости и проницаемости пористого слоя от давления трехслойной гидродинамической смазки радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами / М.А. Мукутадзе // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. – Режим доступа : <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2324>.

6. Мукутадзе, М.А. Стратифицированные слои смазочного материала с различными физико-механическими свойствами / М.А. Мукутадзе // Инженерный Вестник Дона. – 2014. – № 4. Ч. 2. – Режим доступа : <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2746>.

7. Мукутадзе, М.А. Стратификация смазочного материала в радиальных подшипниках скольжения / М.А. Мукутадзе // Инженерный Вестник Дона. – 2015. – № 1. – Режим доступа : <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2735>.

8. Мукутадзе, М.А. Поведение стратифицированных смазочных материалов в упорных подшипниках скольжения / М.А. Мукутадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 1. – С. 140–146.

9. Мукутадзе, М.А. Стратификация смазочного материала в радиальных подшипниках при его осевой подаче и зависимости вязкости от давления / М.А. Мукутадзе // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – Т. 15, № 1(80). – С. 103–113.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы.

– **Ведущей организации** – ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук (ИМАШ РАН, г. Москва). Отзыв подписали: Албагачиев Али Юсупович, д.т.н., проф., зав. лабораторией узлов трения для экстремальных условий, Буяновский Илья Александрович, д.т.н., проф. зав. лабораторией «Метод смазки машин». Отзыв утвердил заместитель директора ИМАШ РАН Киреев И.Д. Отзыв положительный. Замечания: 1) В работе излишне подробно излагается постановка отдельных задач и часто дублируются исходные уравнения. Это помогает пониманию условий, но излишне увеличивает текст. Следовало бы заменить повторное написание уравнений ссылкой на уже имеющиеся. 2) Автору следовало бы перейти от безразмерных переменных к обычным размерным не только в последней главе, где сравниваются теоретические и экспериментальные результаты, но и при графическом представлении полученных зависимостей. 3) В разделе 5.2 формируется расчетная модель радиального подшипника с опорным пористым слоем, работающего в нестационарном режиме, но описание течения смазочного материала в пористом слое выполнено для стационарного режима без всякого обоснования. 4) В подавляющем большинстве задач автором не учитывается зависимость вязкости смазочного материала и ряда других его свойств от температуры, что является, на наш взгляд, существенным недостатком работы. 5) Разработанная и изложенная автором в главе 8 методика разработки расчетных моделей для трехслойных стратифицированных смазочных материалов, основанная на автомодельном решении, характеризуется в диссертации как многоступенчатая и громоздкая. Такая характеристика автором собственного важного результата оставляет вопрос: возможно ли его использование в практических целях инженером-проектировщиком и самим автором? Ответ на этот вопрос наглядно не следует из текста диссертации.

– **Официального оппонента** – д.т.н., проф. Захарова С.М., главного научного сотрудника отделения «Транспортное материаловедение» ОАО «ВНИИЖТ». Отзыв положительный. Замечания: 1) Не указано, для каких диапазонов удельных нагрузок и скоростей скольжения допустимо применение различных расчетных моделей, предложенных в работе, и каково будет изменение этих диапазонов при применении результатов данной работы. Не указаны предельные показатели, начиная с которых необходимо уже учитывать другие явления: деформацию поверхностей трения, тепловые процессы, турбулентность течения и др. 2) При постановке задач гидродинамического расчета подшипников скольжения отсутствуют уравнения баланса энергии, в частности, в виде уравнений выделения и переноса тепла. Температура смазочного материала считается постоянной и заданной. Для поставленных целей диссертации, состоящих в создании уточненных расчетных моделей радиальных, радиально-упорных подшипников, а также подшипников скольжения, работающих на вязких, вязкоупругих, вязкопластичных, микрополярных и ферромагнитных смазочных жидкостях, такое допущение требует обоснований и доказательств возможности их использования для достижения сформулированных целей работы. К тому же максимальная температура в смазочном слое, которая обычно определяется при расчетах подшипников, является одним из параметров, определяющих допустимые режимы работы подшипника скольжения. 3) В моделях

подшипников, работающих на смазочных материалах с ньютоновскими и неニュтоновскими свойствами, следует учитывать зависимость вязкости как от давления, так и от температуры. **4)** Нельзя согласиться с утверждением (стр. 32) о неприемлемости использования уравнения Рейнольдса и его различных модификаций для исследований и расчетов подшипников жидкостного трения, работающих в неустановившихся режимах. Утверждение, что между результатами теоретических решений при использовании уравнения Рейнольдса и экспериментами имеются большие расхождения, делается со ссылкой на работы зарубежных исследований (Dowson et al, Phylipsic, Stefan). К подшипникам, работающим в этих условиях, на которые указывает статья Dowson et al, относятся динамически-нагруженные (сложно-нагруженные, нестационарно-нагруженные) подшипники скольжения коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания и поршневых компрессоров. Многолетний опыт расчетов этих типов подшипников, состоящий в численном решении системы уравнений квазистационарного движения вала на смазочном слое, переноса тепла с учетом уравнения состояния смазочного материала, в которых реакция смазочного слоя определяется на основе решений уравнения Рейнольдса и его модификаций, и сравнение полученных результатов расчетных исследований с экспериментами по измерению минимальной толщины смазочного слоя, траекторий движения вала и температуры, показывают правомерность и целесообразность данных подходов для рассматриваемых условий работы подшипников. **5)** При решении практических задач (гл. 5) учитывается источник подачи смазочного материала, но не принимается во внимание реальная форма маслораспределительных устройств (карманов и канавок), оказывающих большое влияние как на распределение давлений, реакцию смазочного слоя и несущую способность подшипника, так и на составляющие уравнения переноса тепла. **6)** В задаче о расчете радиального подшипника, у которого ось вала находится под углом к оси подшипника, перекос вала назван девиацией. Мы в своих работах называем девиацией угловые перемещения шейки вала под действием сил и моментов, имеющих место в сложной трибосистеме «коленчатый вал – подшипники – их опоры». В рецензируемой работе задача о перекосе вала в подшипнике решается в виде линейной суперпозиции решений двух плоских задач в смещенных вдоль оси сечениях. При этом ни деформация втулки из-за осевой несимметрии распределения давления, ни влияние изменения тепловыделения в смазочном слое не учитываются. **7)** Термин «адаптивный профиль» не очень удачен. Модели для его нахождения, вообще говоря, должны быть результатом решения эластогидродинамической задачи, а не подбором профиля, обеспечивающего максимальную несущую способность для данных условий работы подшипника. Если общие условия работы подшипника изменяются, то профиль тоже должен изменяться, – в этом заключается его адаптивность. **8)** Проведенные экспериментальные исследования только в небольшой степени воспроизводят условия, исследованные в расчетных моделях. Кроме того, как следует из табл. 9.4, учет сжимаемости смазочного материала мало влияет на режим работы, оцениваемый по коэффициенту трения. **9)** Полученные в работе решения задач для разных вариантов конструкций подшипников скольжения, применяемых смазочных материалов и условий работы нуждаются в создании программ, которые реализовывали бы полученные в работе результаты и давали возможность конструкторам, задавая тип узла и условия его работы получать все нужные расчетные характеристики и оценивать пригодность подшипника для данных условий работы и применяемых материалов.

– **Официального оппонента** – д.т.н., проф.. Ю.В. Рождественского, зав. каф. «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», научный руководитель вузовско-академической лаборатории «Триботехника». Отзыв положительный. Замечания: **1)** В обзоре анализируется малое количество современных зарубежных публикаций. При рассмотрении задач о стратифицированных смазочных материалах в работе отсутствуют ссылки на зарубежные публикации. **2)** Ни одна модель автора не сравнивается с известными тестовыми решениями других отечественных или зарубежных ученых. **3)** В работе следовало бы везде учитывать зависимость вязкости смазочного материала от температуры, что является, на наш взгляд, более важным, чем влияние давления. **4)** К сожалению, в работе отсутствуют подробности использования метода Гира и не приведены траектории движения шейки вала на смазочном слое, позволяющие наглядно оценить устойчивость движения вала. **5)** Вязкостные неньютоновские характеристики целесообразно определять не на вискозиметре RN-4 со скоростью сдвига до 10^3 с^{-1} , а на вискозиметре TANNASTBS 2100E со скоростью сдвига 10^6 с^{-1} , позволяющем реализовать оценку по международной вязкостной классификации SAEJ 300. **6)** Диссертация трудно читается. В каждой главе приняты свои обозначения. Непонятно различие в терминах: μ – коэффициент динамической вязкости и μ' – динамический коэффициент вязкости.

– **Официального оппонента** – д.т.н., проф. Е.А. Памфилова, проф. кафедры «Машиностроение и материаловедение» ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». Отзыв положительный. Замечания: **1)** Не совсем удачной представляется структура диссертации. Ее теоретическая часть составляет подавляющий объем диссертационной работы, в то время как исследованиям, подтверждающим возможность ее практической реализации, уделяется гораздо меньше внимания. **2)** Объем диссертации представляется излишне большим, он мог бы быть значительно сокращен за счет компактного изложения материала и его рациональной систематизации в пределах отдельных разделов. **3)** Перечень поставленных автором и решаемых им задач представляется чрезмерно широким, а задача 8, в которой формулируется содержание экспериментальных исследований, вообще в пределах одной диссертационной работы представляется трудно выполнимой. **4)** При формулировке предмета исследований автором анонсируется разработка комплекса расчетных моделей конструкций узлов подшипников скольжения, однако невозможно представить работоспособную методику расчета подшипника скольжения без учета его конструктивных особенностей, режима работы, свойств смазки и т.д. Поэтому в диссертации было бы желательно привести пример алгоритма выполнения такого расчета. **5)** В выводах по отдельным разделам диссертации – 2, 3, 4 и др. – недостаточно четко отражены возможные пути использования полученных закономерностей для достижения задачи повышения работоспособности той или иной подшипниковой схемы. **6)** Представляется не вполне рациональной и сложно выполняемой технологически схема модернизации подшипника качения буксовых узлов, представленная в приложении 10 (стр. 476). **7)** Недостаточно информативными представляются методики экспериментальных исследований и полученные в процессе их выполнения результаты. Поэтому желательно, чтобы каждый эксперимент сопровождался обсуждением того, какой именно теоретический результат подтвержден и в какой степени. **8)** Вводимая автором характеристика трибоузла «профиль, адаптированный к условиям трения», как следует из полученных результатов,

например, при решении задачи с установившимся течением двухслойного смазочного материала в радиальном подшипнике при зависимости вязкости и проницаемости пористого покрытия от давления (раздел 7), оказывает существенное влияние на несущую способность подшипника. К сожалению, автор не уделяет достаточного внимания определению этой характеристики и методике ее определения и оптимизации как теоретически, так и экспериментально. 9) Большинство параметров решаемых в диссертации задач задаются безразмерными, что снижает наглядность полученных результатов из-за отсутствия ссылок на конкретные примеры с указанием размеров, скоростей, давлений, реологии смазочных сред. Представляется также, что вводимые допущения и получаемые решения заслуживают более обстоятельного обсуждения, в том числе определение предельных значений параметров задачи, ограничивающих область удовлетворительного описания моделируемых процессов, оценки численной устойчивости решений.

На автореферат поступило 19 отзывов. Все отзывы положительные.

1. Отзыв д.ф.-м.н., акад. лаб. трибологии ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» РАН (ИПМех РАН) Горячевой И.Г. Замечание: Формулировки модельных задач, изложенных в автореферате, предполагают постоянство температуры смазочного слоя, которая считается заданной. Это серьезное допущение, которое требует обоснования.

2. Отзыв д.т.н., проф., зав. лаб. трибологии и технологии ремонта нефтегазового оборудования ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина» Елагиной О.Ю. Замечания: 1) В разделе 9 Общих выводов по работе, на стр. 27, указывается, что «...средняя погрешность моделей по величине коэффициента трения составляет $\pm 10,7\%$, а по величине несущей способности $\pm 10,2\%$ ». С учетом того, что автор представляет результаты построения и исследования целого класса моделей, такая обобщенная формулировка не может адекватно характеризовать каждую из разработок. 2) В этом же разделе при сообщении о внедрении результатов на четырех промышленных предприятиях автор не указывает, какие именно результаты и в какой форме были внедрены. 3) Представляется, что сообщаемые в автореферате экспериментальные результаты заслуживают более обстоятельного обсуждения.

3. Отзыв д.т.н., проф. зав. каф. робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» Подураева Ю.В. Замечания: 1) Анонсируемые в п. 6 Положений, выдвигаемых на защиту (стр. 7) новые конструкции фрикционных демпферов, разработанные с учетом демпфирующих свойств масляного слоя, остались за рамками основного текста автореферата. Поэтому вывод 8 (стр. 24) требует дополнительного обоснования и обсуждения физической картины демпфирования рассмотренным устройством. 2) Большой объем теоретического материала и рассмотренных задач, к сожалению, в ряде случаев приведен за счет сокращения текста, посвященного постановке задач, вводимым допущениям и анализу их следствий. 3) Приведенные в таблице 1 (стр. 21) результаты сравнения теоретических и экспериментальных результатов для коэффициента трения и толщины смазочной пленки, полученные для различных смазочных материалов, не содержат никакой количественной информации о механических свойствах этих смазок (вязкий, вязкоупругий, вязкопластичный), электропроводности (токопроводящий), молекулярной структуре (микрополярный), что снижает ценность и информативность приведенных данных.

4. Отзыв д.т.н., проф. каф. механики института радиотехнических систем управления Южного федерального университета Бутенко В.И. Замечания: 1) Следовало бы более подробно пояснить рабочую схему, представленную на рис. 1, автореферата (стр. 9) и использованную для решения задачи об упорном подшипнике с адаптированным к условиям трения упорным профилем. 2) В автореферате не конкретизированы смазочные материалы и легкоплавкие сплавы, использованные при проведении экспериментальных исследований.

5. Отзыв д.т.н., проф. директора ООО «Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института» Шолома В.Ю. Замечания: 1) Не во всех расчетных моделях учитывается температурный разогрев трибосистемы. 2) В автореферате, при описании гл.9, не уточняется, каким образом определялся факт образования смазочной пленки, а также как определялась ее толщина. 3) Из автореферата неясно, какие именно новые экспериментальные радиально-упорные подшипники скольжения были применены при опытно-промышленных испытаниях в ОАО «Роствертол».

6. Отзыв д.т.н., проф., заслуженного деятеля науки и техники РФ, зав. каф. «Инструментальное производство» ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет» Рыжкина А.А., д.т.н., проф. каф. «Химия» Бурлаковой В.Э. Замечания: 1) В подавляющем числе представленных автором расчетных моделей не учитывается зависимость вязкости смазочного материала от температуры. 2) Рассмотренный слишком большой круг задач недостаточно структурирован, что затрудняет понимание их общности.

7. Отзыв д.т.н., проф. каф. теоретической и компьютерной гидродинамики института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» Снопова А.И. Замечания: 1) Автору желательно было бы привести в автореферате более четкие постановки не только математических, но и прикладных проблем, для решения которых разработаны модельные представления и расчетные методики, а также выбрать более наглядную иллюстрацию результатов моделирования, что могло бы убедительно подтвердить эффективность разработок. 2) Из текста автореферата неясно, даны ли рекомендации конечному пользователю разработанной методики, а также какие именно методики следует использовать.

8. Отзыв к.т.н., и.о. заведующего каф. «Механика и инженерная графика» Самарского государственного университета путей сообщения Свечникова А.А., д.т.н., проф. каф. «Механика и инженерная графика» СамГУПС Кудюрова Л.В., д.т.н. проф. каф. «Механика и инженерная графика» СамГУПС Карышева Ю.Д. Замечаний нет.

9. Отзыв д.т.н., проф. каф. «Технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» Сидякина Ю.И. Замечания: 1) Имеются затруднения при анализе и сопоставлении экспериментальных данных, содержащихся в таблицах 1 и 3, т.к. общие характеристики смазочных материалов приведены без указания величин вязкости, пластичности, а характеристика «микрополярный» без конкретного количественного описания вообще может трактоваться произвольно. 2) К сожалению, автор не приводит в автореферате указаний на область применения каждого разработанного расчетного метода применительно к отдельным конкретным типоразмерам подшипников, диапазону их рабочих характеристик, возможным «жестоким» эксплуатационным условиям; все это может затруднить выход в практику полученных результатов. 3) Недостаточно четко

прослеживается взаимосвязь теоретических положений разработанных и представленных к защите расчетных моделей трибосистем для их практической реализации в конкретных конструкциях подшипниковых узлов. Нет количественной (в %) оценки «повышения» нагрузочной способности разработанного комплекса расчетных моделей новых трибосистем подшипников по сравнению с традиционными.

4) Непонятно, как следует понимать фразу (см. п. 7 Общих выводов): «...при наличии перекоса шейки вала...дополнительные составляющие несущей способности подшипника увеличиваются с ростом перекоса...».

10. Отзыв д.т.н., проф. каф. «Теоретическая механика» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС) Нехаева В.А. и д.т.н., проф., зав. каф. «Теоретическая механика» Николаева В.А.; Замечания: **1)** На с. 11 автор утверждает, что безразмерная несущая способность подшипника имеет четкий максимум при значении параметров опорного профиля $\omega = (3/2)\pi$ и $\alpha = 0,4$. Вместе с тем здесь же, на рис. 2, показано, что при этом значении параметра ω безразмерная несущая способность подшипника W является минимальной. **2)** На рис. 4 (с. 13) автор приводит оценки влияния параметров пластичности и сжимаемости на несущую способность радиального подшипника. Почему основное значение параметра сжимаемости принято равным 100? Для разных видов смазочного материала базовое значение этого параметра, как нам представляется, будет также разным. **3)** На с. 13 и с. 14 автор приводит результаты исследования несущей способности двухслойного пористого радиального подшипника конечной длины в процессе неустановившегося движения вязкого несжимаемого материала, подаваемого по оси с торца подшипника, и утверждает, согласно формуле (20) и рис. 6, что с ростом параметра безразмерной длины γ безразмерная компонента поддерживающей силы увеличивается. Это корректно при полном заполнении смазочным материалом всего зазора подшипника. Но если процесс еще не установлен, то на дальнем конце подшипника (соответствует максимальному значению γ) смазка еще отсутствует, следовательно, отсутствует и поддерживающая сила. Почему, как показано на рис. 6, безразмерная компонента поддерживающей силы отсутствует на ближнем торце радиального подшипника (в месте подачи смазки) и является максимальной на дальнем торце подшипника? **4)** В формулах (23), приведенных на с. 15, отсутствует пояснение параметра e_2 , от отношения которого к параметру b зависят поддерживающая сила и сила трения (на рис. 7 показан только эксцентрикситет e_1).

11. Отзыв д.т.н., проф. каф. «Мехатроника и международный инжиниринг» ФГБОУ ВПО «Приокский государственный университет» (г. Орел) Чернышева В.И. Замечание: При анализе материалов автореферата возник вопрос, требующий уточнения, а именно: каким образом выполнялся анализ множества входных факторов и выборов тех из них, которые при последующем составлении математических моделей были признаны значимыми?

12. Отзыв д.т.н., проф. каф. «Механики, конструирования и технологий в машиностроении», заслуженного деятеля науки и техники Северо-Кавказского федерального университета (г. Ставрополь) Пенкина Н.С. Замечаний нет.

13. Отзыв д.ф.-м.н., доц., зав. лаб. механики активных материалов Южного научного центра РАН Еремеева В.А. Замечание: Целесообразно было бы рассмотреть также влияние температуры на реологические свойства жидкости.

14. Отзыв д.т.н., проф. каф. «Автомобильный транспорт и организация дорожного движения» Южно-Российского государственного политехнического университета

(НПИ) имени М.И. Платова Шульги Г.И. Замечания: 1) в табл. 1, 3 автореферата не приведены конкретные марки вязкого, вязкоупругого, вязкопластичного, микрополярного, токопроводящего смазочного материала, что затрудняет интерпретацию приведенных результатов исследований. 2) Не приведена методика определения толщины гидродинамической смазочной пленки. 3) В табл. 2 автореферата не приведены конкретная величина пористости покрытия и ее влияние на несущую способность гидродинамических смазочных слоев.

15. Отзыв д.ф.-м. н., проф. каф. общей физики Московского физико-технического института Каменец Ф.Ф. Замечания: 1) Альтернативным подходом к решению задач, аналогичных исследованным автором, является подход, основанный на использовании современных вычислительных пакетов, основанных на методах конечных элементов и конечных разностей. В качестве примера можно привести работы Eling R., van Osten R., Rixen D. Dynamics of Rotors on Hydrodynamic Bearings (Proc. of the 2013 COMSOL Conference, Rotterdam), San Andres L. Gas Bearings for Microturbomachinery: Rotordynamic Performance & Stability (Proc. of the 8th IFTOMM International Conference). Весьма желательным и дающим дополнительное обоснование выводам работы было бы сопоставление результатов, полученных аналитически и численно, хотя бы для отдельных задач. 2) В тексте автореферата нет указаний на ситуации, при которых происходит нарушение целостности смазочной пленки и наступает непосредственный контакт вала с поверхностью подшипника. Неясно, вызвано ли это некими заведомо введенными ограничениями, или следует из полученных аналитических решений.

16. Отзыв к.т.н., доц. каф. «Вагоны и вагонное хозяйство» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) Воронова Ю.В., к.т.н., доцента каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», заслуженного изобретателя СССР, конструктора ИЗТМ Еремеева В.К., к.т.н., доц. каф. «Вагоны и вагонное хозяйство» Железняка В.Н. и д.т.н., проф. каф. «Вагоны и вагонное хозяйство» Тюнькова В.В. Замечания: 1) Какие основные характеристики и типы смазочных материалов использовал автор? 2) Автор упоминает о новых достижениях в области конструкции подшипников скольжения, но не приводит их основные характеристики. 3) В этой работе были бы полезны ссылки на труды известного в этой области ученого Синицына В.В. 4) К сожалению, автор не приводит конкретных результатов испытаний подшипниковых буксовых узлов подвижного состава ОАО «РЖД», что было бы нам весьма интересно и полезно знать.

17. Отзыв д.т.н., проф., зав. кафедрой «Оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВПО Кубанский государственный технологический университет П.С. Куиной. Замечания: 1). Таблицы 1 и 3, сопоставляющие экспериментальные результаты, содержат весьма общие характеристики смазочных материалов без указания величин вязкости, пластичности. Характеристика «микрополярный» без конкретного количественного описания может трактоваться произвольно широко. 2). Перечень теоретических вопросов, решенных в диссертации, достаточно широк. К сожалению, автор не приводит в автореферате указаний на область применения каждого разработанного расчетного метода – типоразмера подшипника, диапазона рабочих характеристик, возможных условий его работы, что может затруднить выход в практику полученных результатов.

18. Отзыв д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой «Высшая математика» Ульяновского государственного технического университета П.А. Вельмисова. Замечания: 1). Автору желательно было бы привести в автореферате более четкие постановки не только математических, но и прикладных проблем, для решения которых разработаны

модельные представления и расчетные методики, а также выбрать более наглядную иллюстрацию результатов моделирования, что могло бы убедительно подтвердить эффективность применения выполненных разработок.

19. Отзыв д.т.н., доцента кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения». М.Г. Крукович и д.т.н., проф. Н.Н. Воронина. Замечания: 1). Заявление о точном автомодельном решении задачи (6) (стр. 10 авторефера, вторая строка сверху, стр. 11, стр. 14) является не совсем корректным с математической точки зрения, так как поиск решения ведется с точностью до членов второго порядка. К тому же сама постановка задачи носит приближенный характер, о чем свидетельствует приведенная погрешность (табл. 1) между расчетными и опытными данными, которая составляет от 6,3 до 27,7 %. 2). На странице 15, 10-я строка снизу пропущено слово «решения». Должно быть написано: «...доказана теорема существования и единственности **решения** плоской нелинейной задачи». 3). В пункте 8 выводов автор приводит к «оригинальному» выводу, что любой способ подачи смазочного материала повышает устойчивость работы подшипника в сравнении с отсутствием смазывания.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их значительной публикационной активностью в области исследований гидродинамических подшипников скольжения, работающих на неклассических смазочных материалах; научно-исследовательской деятельностью в организациях, имеющих в своей структуре высокоэффективные лаборатории, исследующие подшипники, смазочные материалы и другие вопросы рассматриваемой области, а также их личными достижениями в разработке целого ряда фундаментальных проблем гидродинамического трения. Выбор ведущей организации определяется специализацией и высоким уровнем её лабораторий в рассматриваемой области исследований, значительным количеством эффективных разработок и широким кругом публикаций её сотрудников в ведущих специализированных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований

- **разработана:** система расчетных многофакторных универсальных моделей подшипников скольжения, охватывающая широкий спектр основополагающих и смежных трибологических задач, одновременно описывающая различные аспекты целого класса трибосистем;

- **предложены:** оригинальная обобщенная методология применения автомодельной переменной для уточненного решения неклассических задач 1) о гидродинамическом смазывании подшипников неильтоновскими жидкостями с различными реологическими свойствами: вязкоупругими, вязкопластичными, микрополярными; 2) в условиях таких свойств опорных поверхностей как упругость, податливость, пористость;

- **доказана:** корректность и информативность расчетных моделей подшипников с применением в качестве смазочных материалов: 1) расплавов легкоплавких металлов, обладающих сжимаемостью, вязкоупругими и микрополярными свойствами; 2) смазочных сред, расслаивающихся на два и три слоя с различными реологическими характеристиками;

- **введены:** в расчеты по формированию моделей подшипников скольжения в зависимости от их конструкции (радиальные или упорные), автомодельные переменные различного вида.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что:

- **доказаны:** необходимость и перспективность для повышения точности моделей гидродинамических подшипников: 1) учета сжимаемости смазочного материала; 2)

зависимости проницаемости опорного пористого слоя от давления; 3) введения в расчеты некруглого адаптированного к условиям гидродинамики опорного профиля;

– **изложены:** на основании анализа теоретических моделей основные закономерности влияния реологических свойств смазочных материалов на несущую способность подшипников: 1) микрополярный смазочный материал повышает несущую способность с ростом параметра, определяющего микрополярные свойства; 2) вязкоупругий смазочный материал увеличивает несущую способность при уменьшении числа Дебора; 3) вязкопластичный смазочный материал повышает несущую способность при росте параметра пластичности; 4) электропроводящий смазочный материал увеличивает несущую способность с ростом напряженности электрического поля;

– **раскрыты:** особенности и перспективы применения металлических расплавов, используемых в качестве смазочного материала, повышающего несущую способность подшипника с ростом параметра, связывающего вязкость и удельную теплоту плавления;

– **изучена:** связь величины дополнительной составляющей силы трения радиального подшипника конечных размеров с величиной перекоса шейки вала в подшипниковой втулке и способом подачи смазочного материала;

– **проведена модернизация:** существующих расчетных моделей подшипников скольжения с учетом целого ряда дополнительных конструктивных и эксплуатационных факторов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– **разработаны:** новые уточненные расчетные модели гидродинамических подшипников скольжения, работающих на неклассических смазочных материалах, и подтверждены экспериментально в лабораторных и промышленных условиях, в том числе: 1) на Лопастном заводе ОАО «Роствертол» в подшипниках редуктора ленточно-шлифовального станка для обработки лонжерона несущего винта вертолета; 2) в Сервисном ремонтном локомотивном депо Тимашевск-Кавказский в буксовом узле вибродиагностического прибора СД-21;

– **внедрены:** 1) в НПП ООО «Транстриботехника» и ЗАО «Специальное конструкторское бюро автоматических линий и металорежущих станков» для использования в проектной документации раздела «Конструктивные расчетные модели малогабаритных подшипников скольжения при многослойной смазке»; 2) в Северо-Кавказской дирекции тяги – филиале ОАО «РЖД» на моторно-осевых подшипниках локомотива ВЛ-80; 3) в ЗАО «Донкузлитмаш» в шпиндельных узлах фрезерных станков;

– **определены:** перспективы и области рационального применения разработанной методологии решения триботехнических задач в области гидродинамического смазывания неьютоновскими жидкостями – как в различных машиностроительных отраслях, так и в учебном процессе подготовки инженеров-трибологов;

– **представлены:** методические рекомендации и расчетные модели для определения следующих параметров подшипников скольжения в условиях их стационарной и нестационарной работы: несущей способности, коэффициента трения, границ устойчивой работы;

– **созданы:** общеметодологические рекомендации, позволившие получить уточненные расчетные модели и на их основе предложить и запатентовать новые инженерные решения в области триботехники.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– **экспериментальные работы** проводились на современном высокоточном стандартном экспериментальном оборудовании (Т-11, СМТ-1), своевременно прошедшем госповерку, а также на специальном стенде (на базе станка НС-12) с поверенным нагружающим и измерительным оборудованием; все эксперименты включали не менее трех опытов, их результаты обрабатывались статистически, что доказывает полную достоверность полученных экспериментальных результатов;

– теория построена на корректно поставленных и решенных задачах, основанных на известных общих положениях гидродинамической теории течения жидкостей Навье – Стокса и Рейнольдса, дополненных известными классическими уравнениями Вейсбаха – Дарси и других ученых; достоверность полученных результатов подтверждается лабораторными и промышленными испытаниями и внедрением;

– идея базируется на обобщении опыта применения для решения трибологических задач неклассической гидродинамики автомодельной переменной;

– использованы результаты теоретических исследований Л.Д. Ландау и школы профессора К.С. Ахвердиева, полученные ранее по рассматриваемой тематике;

– **использованы** современные методики сбора, анализа и обработки информации как в виде традиционных библиотечных, так и в виде электронных ресурсов.

Личный вклад соискателя состоит: в сборе и анализе необходимой информации; корректной постановке исследовательских задач; самостоятельном выборе методологии, решении задач, численном анализе и графическом представлении их результатов; в выборе экспериментальных методик и оборудования, а также в непосредственном личном участии в экспериментальных исследованиях, обработке и интерпретации результатов; в участии при разработке материалов для последующих промышленных испытаний и внедрения.

На заседании 23 октября 2015 г. диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация Мукутадзе Мурмана Александровича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой представлен новый теоретически обоснованный экспериментально подтвержденный комплекс расчетных моделей подшипников скольжения, работающих в режиме гидродинамики на нетрадиционных смазочных материалах, что является решением важной научной проблемы, направленной на существенное повышение качества трибоузлов железнодорожного транспорта, и принял решение присудить Мукутадзе Мурману Александровичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 9 докторов наук по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах», участвующих в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 13, против – 1, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель диссертационного совета
Д 218.010.02 академик РАН

Колесников Владимир Иванович

Ученый секретарь диссертационного совета Д 218.010.02 д.т.н., профессор

Щербак Петр Николаевич

«/8» ноября 2015 г.