

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента  
на диссертационную работу Мукутадзе Мурмана Александровича  
«Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на  
основе развития гидродинамической и реодинамической теории  
смазки»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических  
наук по специальности: 05.02.04 – «Трение и износ в машинах»  
в диссертационный совет Д 218.010.02 при ФГБОУ ВПО  
«Ростовский государственный университет путей сообщения»

### **Актуальность работы**

Гидродинамическая теория смазки относится к числу классических разделов трибологии. За прошедший более чем вековой период развития она далеко продвинулась в решении как теоретических, так и практических задач. В последние годы наблюдается возрастание интереса специалистов разных странах мира к данной проблематике, что вызвано расширением областей применения подшипников скольжения, разнообразием их конструктивных решений, изучением новых явлений, связанных с особенностями работы узлов трения, работающими в гидродинамических режимах, созданием новых смазочных материалов, обладающих малоизученными свойствами. Одним из свидетельств интереса к этой проблеме являются систематические публикации по этим вопросам в международных журналах, а также ряд монографий по этой проблеме.

Анализ публикаций по гидродинамической смазке подшипников скольжения показывает, что интерес исследователей к данной проблематике вызван не только потребностями техники, но и фундаментальным характером проблем, которые приходится решать при изучении режимов работы подшипников скольжения, а также возможностями использования свойств смазочной среды для расширения диапазона работы подшипников скольжения.

Рецензуемая работа находится в русле решаемых в мире проблем, связанных с подшипниками скольжения, работающими в условиях гидродинамической смазки и позволяющих учитывать особенности конструкций подшипников, реологические характеристики смазочных сред, (сжимаемость, вязкоупругость, вязкопластичность, микрополярность), пористость сред, профиль поверхностей вкладышей и втулок, тип подшипников скольжения (радиальные,

радиально-упорные, упорные), способы подачи смазочного материала в зону трения, благодаря применению созданных школой проф. К.С Ахвердиева и развитых автором диссертации системы аналитических методов решения разнообразных задач гидродинамической смазки подшипников скольжения. При этом разработанный математический аппарат позволяет выполнять количественные оценки характеристик моделируемых подшипников, включая несущую способность, диапазон скоростей устойчивой работы, демпфирующую способность, и ряд других задач.

В связи с этим цель, предмет, объект исследования, его содержание, разработанные автором методы моделирования и полученные результаты обладают актуальностью, как для решения прикладных задач для различных видов подшипников скольжения, работающих в условиях гидродинамической смазки, так и для поиска или расширения новых областей их приложения.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Строгий математический анализ полученных уравнений описывающих свойства моделируемых смазочных материалов, движущихся в переменных зазорах и пористых средах, корректное использование методов прикладной математики при их численном решении, анализ полученных результатов подтверждают адекватность разработанных модельных представлений, способность описания ими, в рамках сделанных допущений, основных процессов в трибосистеме. Часть теоретических результатов была верифицирована экспериментально, подтвердив удовлетворительное согласие результатов моделирования и экспериментов на образцах подшипников и смазочных материалов.

Разработанные методы и полученные результаты в течение 20 лет докладывались на научных конференциях по проблемам триботехники и смежным областям. Соискателем было опубликовано (вместе с соавторами) по теме исследования более 80 статей, включая 49 статей, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК.

Применительно к техническим задачам ряда промышленных, транспортных предприятий, конструкторских бюро, а также научно-производственного предприятия по производству смазочных

материалов сформулированы и внедрены рекомендации, позволившие подтвердить полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты. Изложенное выше подтверждает обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации.

### **Научная новизна работы**

Важнейшим фундаментальным научным результатом диссертации М.А. Мукутадзе, определяющим ее вклад в трибологию, является развитый им и распространенный на различные конструкции подшипников скольжения и использования смазочных материалов метод формирования расчетных моделей на основе применения для решения этих задач автомодельных переменных. Необходимо отметить общность этого подхода, который позволил успешно описать гидродинамический режим работы радиальных, радиально-упорных и упорных подшипников скольжения при учете сжимаемости, вязкоупругости, вязкопластичности, стратифицируемости жидкых смазок, микрополярных жидкостей и расплавов металлов, используемых в качестве смазочных материалов. Решения на базе этого подхода задач о работе радиального подшипника скольжения в условиях перекоса шейки вала, о гидродинамическом смазывании при наличии пористых поверхностей на шейке вала и втулки с учетом направления подачи смазки получены впервые и обладают научной ценностью, благодаря возможности углубленного исследования узлов трения путем вариации факторов и изучения их влияния на основные показатели функционирования подшипников жидкостного трения.

Научной новизной обладает как примененный подход к моделированию процесса двухслойной стратификации смазочного материала, так и полученные на его основе количественные оценки демпфирующих свойств радиальных, упорных и радиально-упорных подшипников с пористыми конструктивными элементами на опорных поверхностях.

### **Практическая значимость работы**

Предложены различные модели расчета параметров подшипников скольжения, работающих в условиях жидкостной смазки на смазочных материалах различной реологии. Для конкретных условий

эксплуатации, требований к несущей способности и скоростям, характеристикам смазочных материалов, что выступает как ограничения, эти модели могут быть использованы для многокритериальной оптимизации конструкции подшипников. При этом целевыми критериями могут быть размеры, пористость поверхностей вала и втулки, профиль ее поверхности. Установленные в работе закономерности влияния вязкости, относительного эксцентричества, параметра опорного профиля на несущую способность подшипника позволяют сузить область поиска оптимума в пространстве варьируемых факторов.

Результаты исследования демпфирующих свойств конструкций подшипников с пористыми поверхностями и полученные на их основе рекомендации позволяют улучшить характеристики виброустойчивости и вибродеятельности механизмов с повышенными требованиями к точности и плавности хода.

Эффективность и перспективы применения ряда результатов работы подтверждены документами об их использовании на ряде промышленных и транспортных предприятий.

### **Замечания по работе**

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 скольжение 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 жидкостей, такое допущение требуют 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 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 ( глава 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 измениться - 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.

## Выводы

1. Тема диссертационного исследования М.А. Мукутадзе актуальна. Предложенная и развитая в работе методология моделирования,

разработанные на ее основе расчетные методы, результаты и рекомендации могут быть охарактеризованы как имеющие научную новизну и практическую значимость. Внедрение результатов диссертации в форме расчетных методик и рекомендаций по выбору конструктивных решений подшипников скольжения и смазочных материалов позволит повысить технологический уровень производимых на данных предприятиях изделий содержащих узлы трения.

2. Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием научных положений и методов гидромеханики жидкостей со сложной реологией, экспериментальной проверкой ряда полученных результатов.

3. Диссертация представляет собой законченное научное исследование. Ряд результатов работы апробированы в производственных условиях и подтвердили свою результативность.

4. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание.

5. По теме диссертации автором опубликовано более 80 научных работ, в том числе 49 – в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

### **Заключение**

Диссертационная работа Мукутадзе М.А. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему, и является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения по системе расчетных моделей подшипников скольжения, работающих в условиях гидродинамической смазки, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области развития теории смазочного действия. Результаты работы имеют значение для развития высокотехнологичных отраслей промышленности страны. Работа полностью отвечает паспорту специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах», и может быть отнесена к областям исследований: смазочное действие и физическое и математическое моделирование.

Изложенное позволяет утверждать, что диссертационная работа «Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям по техническим наукам, а ее автор Мукутадзе Мурман Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах».

Доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
отделение «Транспортное материаловедение»,  
ОАО «Научно-исследовательский институт  
железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»),  
адрес 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д.10,  
zakharovsm@vniizht.ru , тел. 8 (499) 260-44-40.

Захаров Сергей Михайлович

22.09.2015

Подпись Захарова С.М. заверяю:

Начальник отдела управления  
персоналом ОАО «ВНИИЖТ»  
Даничева Н.А.

