

ОТЗЫВ

официального оппонента **Калимуллина Руслана Флюровича**, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры автомобильного транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет»

на диссертацию **Леванова Игоря Геннадьевича** «Оценка ресурса сложнонагруженных сопряжений турбопоршневых машин с учётом свойств смазочных материалов при моделировании изнашивания», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

1 Актуальность темы исследования

Современные тенденции в машиностроении, и в частности, двигателестроении, характеризуются серьезной конкуренцией между производителями, что обуславливает непрерывное развитие и совершенствование поршневых и роторных машин в направлении повышения их удельной мощности, энергоэффективности и надежности. Обеспечение этих противоречивых требований, зачастую, затруднительно, поскольку при этом разработчикам не удается минимизировать влияние возросшей механической и тепловой нагруженности трибосопряжений на их ресурс.

Одним из эффективных решений этой проблемы является применение для смазывания трибосопряжений различного рода масел, обладающих высокими противоизносными свойствами, за счёт включения в их состав комплекса присадок. Работоспособность таких масел в поршневых и роторных машинах доказана на практике. Однако, потенциал их далеко не исчерпан и может быть реализован на основе новых методов решения задач динамики и смазки сложнонагруженных трибосопряжений поршневых и роторных машин, учитывающих индивидуальные неньютоновские свойства масел. Их применение в современных технологиях проектирования позволит выполнять поисковые и конструкторские разработки по созданию новых энергоэффективных и ресурсосберегающих машин и механизмов.

Представленная на обсуждение научной общественности диссертационная работа Леванова Игоря Геннадьевича, направленная на решение крупной научной проблемы обеспечения надёжности смазываемых узлов трения машин и механизмов за счёт разработки математического, методического, алгоритмического и программного обеспечений для анализа динамики и смазки сложнонагруженных трибосопряжений и оценки их ресурса, а также технических решений, является актуальной, а защите её – своевременной.

2 Оценка содержания диссертации, ее завершенности и качества оформления. Соответствие публикаций и автореферата основным положениям диссертации

Рукопись диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Текст изложен на 376 страницах, включает 13 таблиц, 123 рисунка. Список использованных источников содержит 314 наименований. В приложениях на 77 страницах приведена дополнительная информация.

Диссертация оформлена по общепринятой структуре.

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертации, показана степень её разработанности, сформулированы научная проблема и цель исследования, определены объект и предмет исследования, перечислены задачи исследования, сформулирована научная новизна работы, описана теоретическая и практическая значимость работы, представлены методология и методы исследования, определены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности, приведены сведения о реализации и апробации результатов исследования, дан краткий обзор содержания структурных элементов диссертации.

В *первой главе* рассмотрены: основные подходы, используемые при прогнозировании ресурса машин; виды изнашивания подшипников скольжения; критерии перехода между жидкостным и граничным видом смазки в подшипниках; некоторые работы, посвящённые моделированию изнашивания подшипников при полужидкостной и граничной смазке; оборудование для изучения условий работы подшипников скольжения; современное программное обеспечение, позволяющее моделировать подшипники скольжения.

Основные выводы по главе базируются на результатах анализа выполненных ранее исследований в области прогнозирования ресурса машин и моделирования изнашивания подшипников скольжения, в том числе с учётом специфики влияния видов смазки в них. По выводам первой главы сформулированы научная проблема и цель исследования, определены объект и предмет исследования, поставлены основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния противоизносных компонентов масел на работоспособность подшипника скольжения. В результате был установлен характер влияния некоторых противоизносных присадок в маслах различного назначения на условия смены вида смазки в подшипниках скольжения с гидродинамической на граничную, что послужило основой для разработки математической модели смазочного слоя сложнагруженного подшипника скольжения, учитывающей особенности взаимодействия смазочного материала с поверхностями трения.

В *третьей главе* представлены основные положения методики моделирования процессов смазки и изнашивания в динамически нагруженном подшипнике скольжения с учётом неньютоновских и индивидуальных противоизносных свойств смазочного материала, описанных в результатах экспериментальных исследований.

Подробно и последовательно представлены этапы решения задач для определения износа и ресурса гидродинамических подшипников скольжения: определение его гидромеханических характеристик на основе решения гидродинамической задачи; определение расположения и продолжительности зоны контактного взаимодействия цапфы и втулки; определение износа шейки вала и втулки в зоне их контактного взаимодействия, построение диаграмм износ; определение ресурса подшипника до достижения предельного зазора, построение кривой износа. Использование современных информационных технологий обусловило высокую степень достоверности результатов моделирования и оценки адекватности полученных результатов путем решения тестовых задач.

Четвёртая глава посвящена описанию концепции оценки ресурса сложнонагруженных сопряжений поршневых и роторных машин. Концепция основана на экспериментальных методах исследования реологических и вязкостно-температурных свойств смазочных материалов, микрогеометрии поверхностей трения, а также на физическом и математическом моделировании подшипников скольжения.

В *пятой главе* проведены примеры практического применения разработанных на основе теоретических исследований алгоритмов и программного обеспечения для оценки ресурса динамически нагруженных подшипников скольжения с учётом индивидуальных противоизносных свойств смазочных материалов. Полученные результаты сопоставляются с результатами экспериментальных и теоретических исследований других авторов.

В *шестой главе* содержится описание предлагаемых технических решений для повышения надёжности и ресурса сопряжений машин (например, подшипников скольжения автомобильных двигателей, поршневых компрессоров) – двухступенчатый и разборный масляные фильтры, сигнальное устройство загрязнения масляного фильтра.

В заключении приводятся итоги выполненной работы: основные результаты и выводы, рекомендации по использованию результатов исследования и перспективы развития.

В приложениях, наряду с дополнительной информацией, представлены сведения, подтверждающие использование результатов исследования в АО СОК «Дружба» (г. Челябинск), ГСКБ «Трансдизель» (г. Челябинск), ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» (г. Челябинск), ООО «Элемент» (г. Челябинск) ООО «Уральский дизель-моторный завод» (г. Екатеринбург); в учебном процессе Южно-Уральского государственного университета (НИУ).

Таким образом, содержание диссертации охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается следующими обстоятельствами:

- системностью, последовательностью, согласованностью, логичностью и непротиворечивостью изложения результатов;
- обоснованностью актуальности темы исследования, структуры диссертации, концепции и программы исследования;
- взаимосвязанной методологической платформой и концептуальными

решениями;

- взаимосвязью основной идейной линии, частных и общих выводов.

В целом работа обладает научной новизной и практической значимостью, выполнена на высоком методическом и теоретико-экспериментальном уровне. Качественное техническое оформление (достаточное количество графиков, рисунков, таблиц), чёткое и корректное изложение материала диссертации с приведением результатов расчётов отражают цель диссертационной работы. Сформулированные научные задачи успешно решены, что позволяет сделать вывод о завершённости работы.

Представленные в диссертации научные положения, выносимые на защиту, на мой взгляд, достаточно полно отражены в 63 научных работах автора, что свидетельствует о новизне результатов исследования и об ознакомлении её широким кругом научной и инженерно-технической общественности.

В период с 2007 по 2021 гг. соискатель опубликовал 28 статей в рецензируемых научных изданиях из «Перечня...» ВАК РФ и приравненных к ним зарубежных научных изданиях, а также получил 5 патентов РФ на полезные модели и 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты исследований апробированы на научных конференциях различных уровней.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации; в автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведённое исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований. *Вместе с тем следует отметить, что объём автореферата превышен относительно рекомендованного «Положением о присуждении ученых степеней» в 2 авторских листа.*

В диссертации отсутствуют заимствованные материалы без ссылок на авторов и источники заимствования. В тексте диссертации приведены ссылки на совместные работы, выполненные соискателем в соавторстве. *Вместе с тем, в автореферате не в полной мере приведены ссылки на публикации.*

3 Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

В диссертации содержится совокупность из пяти логически взаимосвязанных положений, обладающих научной новизной, реализация которых способствует повышению достоверности результатов оценки ресурса сложнонагруженных сопряжений турбопоршневых машин на этапах их проектирования и при повышении технического уровня уже существующих с учётом противоизносных свойств смазочных материалов, конструктивных, эксплуатационных и режимных факторов.

Первое положение – полученные в результате экспериментальных исследований закономерности влияния противоизносных компонентов в маслах различного назначения на работоспособность гидродинамического подшипника

скольжения, новизна которых заключается в том, что они указывают на возможность управления за счёт состава смазочного материала условиями работы подшипника, при которых происходит смена режима смазки с гидродинамического на граничный.

Второе положение - математическая модель смазочного слоя сложнонагруженного подшипника скольжения, учитывающая явления существования высоковязкого граничного смазочного слоя на его поверхностях трения и его разрушения под действием сдвига. От аналогичных разработок представленная модель отличается тем, что для описания явления разрушения высоковязкого граничного смазочного слоя использован степенной закон, учитывающий толщину и устойчивость этого слоя к сдвигу.

Третье положение – концепция оценки ресурса сложнонагруженных подшипников скольжения, новизна которой заключается в учёте определяющей роли смазочного материала в процессах изнашивания и экспериментально-расчётных методах их моделирования.

Четвёртое положение – результаты оценки влияния противоизносных свойств смазочного материала на скорость изнашивания, ресурс и гидромеханические характеристики подшипников скольжения турбопоршневых машин (на примере двигателей внутреннего сгорания и турбогенератора), отличающиеся тем, что они позволяют решать обратную задачу по обоснования характеристик поверхностей трения и противоизносных свойств смазочного материала для обеспечения требуемого ресурса машины.

Пятое положение – закономерность изменения критического значения характеристики режима работы подшипника скольжения в зависимости от уровня противоизносных свойств смазочного материала. *Однако, автор не указал отличительные признаки нового результата от известных.*

Доказательная база основных положений диссертационной работы усиливается достаточно обширным и убедительным списком использованных источников, а также работами самого соискателя, в которых отсутствуют противоречия с результатами ранее выполненных исследований.

В заключение диссертации сформулировано семь пунктов результатов и выводов, а также рекомендации и перспективы развития темы.

В преамбуле автор представляет в сжатом виде основную суть своих исследований в виде формулы диссертации. Наличие пункта обосновано, логически увязано с последующими пунктами.

Первый пункт отражает главный результат работы, имеющий теоретическую значимость - разработанный комплекс математических моделей и алгоритмов, описывающих механизмы трения, изнашивания и смазки в сложнонагруженных подшипниках скольжения, использование которого позволяет повысить достоверность прогнозирования их ресурса.

Второй пункт отражает результаты, полученные в экспериментальной части исследования, и по своему содержанию констатирует решение первой задачи и получение первого положения, выносимого на защиту. Содержание данного вывода обосновано, текст изложен в полном соответствии со структурой проделанной работы. Как практическая значимость полученных

результатов автор говорит о разработке составов опытных масел с улучшенными противоизносными свойствами под маркой «GR7». Однако, ни в диссертации, ни в автореферате об этом больше не упоминается, кроме акта использования результатов НИР (приложение 6, стр.366).

Третий пункт является логическим продолжением второго пункта и подтверждает факт полного решения второй задачи, и вместе с этим и обосновывает второе положение, выносимое на защиту.

Четвертый пункт содержит информацию о решении третьей задачи и получении третьего положения, выносимого на защиту - разработке концепции оценки ресурса сложнонагруженных подшипников скольжения турбопоршневых машин, учитывающей влияние противоизносных свойств смазочного материала на гидромеханические характеристики и процесс изнашивания.

Пятый пункт свидетельствует о решении четвертой задачи и достижении главного практического результата исследования (по мнению автора), включенного в четвертое положение, выносимое на защиту.

Вместе с тем, сведения, сформулированные в данном пункте, изложены слишком подробно. Значительную часть информации можно было включить в описание пятой главы.

В шестом пункте сформулирован комплекс рекомендаций для снижения интенсивности изнашивания подшипников скольжения и повышению его ресурса – повышение класса чистоты обработки поверхностей трения для обеспечения критической толщины смазочного слоя не выше 1,5 мкм, снижение тонкости отсева системы фильтрации до 5 мкм, моторные масла, обеспечивающие толщину адсорбционного граничного слоя не менее 1 мкм. *Вместе с тем, этот новый научный результат не включен в положения, выносимых на защиту.*

Седьмой пункт свидетельствует о решении пятой задачи. В нём говорится о разработанных технических решениях для повышения ресурса подшипников скольжения коленчатых валов ДВС за счёт улучшенной степени фильтрации моторного масла.

Вместе с тем, в данном пункте не достаёт сведений, доказывающих технико-экономическую эффективность использования полученных результатов в экономике отрасли.

В заключении также содержатся конкретные рекомендации использования результатов исследования и описание перспектив дальнейшей разработки темы. Целесообразность и обоснованность данного пункта не вызывает сомнения.

Следует отметить удачное совмещение представления результатов и выводов, что повышает информативность работы. В целом по содержанию результаты и выводы отражают решение основных задач исследования. Результаты и выводы являются обобщением теоретических и экспериментальных результатов и представляют несомненную ценность для науки и практики, обладают существенной научной новизной и достоверностью.

В целом, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертанта подтверждается:

- выбранной методологической базой из ранее полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований по решаемой проблеме;
- корректностью применения апробированного в научной практике понятийного, исследовательского и аналитического аппарата;
- новизной научных положений, выносимых на защиту, значением их для отрасли научных знаний;
- глубоким анализом полученных выводов и закономерностей, доказательством их как основания предложенных рекомендаций;
- сопоставлением результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта;
- опытом практической реализации результатов исследования в производстве, научных исследованиях, учебном процессе образовательных учреждений;
- подтверждением результатов экспертными оценками специалистов, обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях;
- публикациями основных результатов исследования в рецензируемых научных изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК РФ.

Достоверность результатов исследования обеспечена следующими факторами:

- использование современных методик сбора и обработки исходной информации;
- построение теории на известных, проверяемых данных, и согласованием ее с результатами ранее выполненных исследований;
- получение экспериментальных данных в результате стендовых испытаний с использованием стандартных и апробированных методов исследований и сертифицированного оборудования;
- установление сходимости результатов экспериментальных и теоретических исследований, совпадение с результатами, представленными в независимых источниках по теме диссертационного исследования;
- непосредственное участие соискателя в получении исходных данных и научных экспериментах;
- точность измерения параметров исследуемых объектов;
- обоснованный подбор объектов (единиц) наблюдения и измерения.

Таким образом, все научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и достоверны.

4 Научная и практическая ценность работы. Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Научная ценность работы заключается в развитии теории и практики исследований по обоснованию конструктивно-технологических требований к параметрам и характеристикам подшипников скольжения и систем смазки

турбопоршневых машин на основе новой информации о закономерностях трения, изнашивания и смазки, что позволяет выявить и реализовать резерв повышения долговечности.

Теоретическая значимость основных результатов диссертации заключается в том, что разработанные научные положения, уточняющие математические модели, закономерности влияния противоизносных свойств смазочного материала, обусловленных адсорбционным высоковязким граничным слоем, на скорость изнашивания поверхностей трения, являются значительным вкладом в методологию расчёта смазываемых сложнагруженных подшипников скольжения и проектирования турбопоршневых машин.

Практическое значение использования полученных научных результатов состоит в развитии алгоритмического и программного обеспечений, испытательных модельных узлов для имитационного и физического исследований процессов трения, изнашивания и смазки в подшипниках скольжения, а также технических решений для повышения эффективности фильтрации масла в системе смазки.

Результаты работы могут быть использованы в практике машиностроительных предприятий и в учебном процессе.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что рецензируемая работа вносит существенный вклад в теорию и практику проектирования объектов машиностроения.

Полученные в диссертации результаты значимы для развития научной специальности 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин, поскольку они вносят вклад в разработку теорий, методов расчётов и проектирования машин, систем приводов, узлов и деталей машин, а именно, моделирования процессов трения, изнашивания и смазки подшипников скольжения, значение для экономики народного хозяйства состоит в совершенствовании существующих и создания новых турбопоршневых машин высокой долговечности и надёжности, обладающих конкурентоспособностью на мировом рынке.

Содержание диссертации соответствует заявляемым областям исследований паспорта научной специальности 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин: п. 2. «Теория и методы проектирования машин и механизмов, систем приводов, узлов и деталей машин»; п. 3 «Теория и методы обеспечения надёжности объектов машиностроения»; п.4 «Методы исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения, в том числе на основе компьютерного моделирования»; п.5 «Повышение точности и достоверности расчётов объектов машиностроения; разработка нормативной базы проектирования, испытания и изготовления объектов машиностроения»; п. 6. «Развитие фундаментальных положений родственных и смежных областей науки применительно к исследованию, проектированию и расчётам объектов машиностроения».

5 Основные замечания по работе

1. При обосновании актуальности темы исследования отнесение сопряжений «поршень-цилиндр» и «кольцо-цилиндр» к сложнагруженным подшипникам скольжения машин и оборудования ошибочно. В связи с этим, учёт публикаций 34 и 52 не корректен. Однако, если результаты исследования могут быть применены для подобных трибосопряжений, то об этом необходимо оговориться в заключении.

2. Формулировка цели работы представляется не корректной, поскольку не отражает основной эффект от результатов исследования, т.е. тот значительный вклад в развитие экономики страны от внедрения новых научно обоснованных технических, технологических или иных решений (согласно п.9 Положения о присуждении ученых степеней). Здесь, по крайней мере, речь должна была идти о *«повышении конкурентоспособности турбопоршневых машин на основе обеспечения их высокой долговечности и надёжности путём увеличения точности и достоверности результатов расчётов ресурса трибосопряжений за счёт учёта уровня противоизносных свойств смазочного материала при моделировании изнашивания»*.

3. Пятое положение, выносимое на защиту, свидетельствует о полученной закономерности изменения критического значения характеристики режима работы подшипника скольжения в зависимости от уровня противоизносных свойств смазочного материала. Однако, автор не указал, в чём научная новизна данного положения. Кроме того, на стр. 31 автореферата автор говорит, что «...критическое значение характеристики режима работы подшипника (обозначено как $\lambda_{кр}$) имеет экспоненциальную зависимость (рисунок 17) от параметра $l_{h0}...$, характеризующего толщину адсорбционного граничного слоя, образуемого моторными маслами...». Вместе с тем, анализ рисунка 17 указывает на линейный вид такой зависимости. Кроме того, о данном новом результате в заключении ничего не сказано.

4. В рассуждениях автора имеется противоречие. Так, из анализа шестого пункта выводов следует, что повышение эффективности фильтрации масла не оказывает заметного влияния на скорость изнашивания подшипников, однако при этом предлагаются технические решения. В то же время какие-либо новые научно обоснованные технические, технологические и иные решения и разработки по чистоте обработки поверхностей шейки и вкладышей и противоизносным присадкам к маслам, влияние которых автором признается существенным, в диссертации не приведены.

5. В заключении автор говорит о разработке составов опытных масел с улучшенными противоизносными свойствами под маркой «GR7». Однако, ни в диссертации, ни в автореферате об этом больше не упоминается, кроме акта использования результатов НИР (приложение 6, стр.366).

6. Поскольку, диссертация имеет прикладной характер, то в ней должны приводиться сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Это требование частично выполняется сведениями, представленными в шестой главе и в приложении. Однако, не

достаёт оценки технико-экономической и иной эффективности использования полученных в диссертации результатов в экономике отрасли, подтверждающие их существенное значение для развития страны (согласно п.9 Положения о присуждении ученых степеней).

6 Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Леванова Игоря Геннадьевича на тему «Оценка ресурса сложнонагруженных сопряжений турбопоршневых машин с учётом свойств смазочных материалов при моделировании изнашивания» соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842 «О порядке присуждения учёных степеней», а именно:

- п. 9 - диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические разработки, имеющие существенное значение для развития теории и практики совершенствования существующих и создания новых турбопоршневых машин;

- п. 10 - диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку; диссертация имеет прикладной характер и в ней приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов; предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями;

- п. 11 - 13 - основные научные результаты диссертации опубликованы в 17 рецензируемых научных изданиях из «Перечня...» ВАК РФ и приравненных к ним 11 зарубежных научных изданиях, 5 патентах на полезные модели и 12 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ;

- п. 14 - в диссертации соискатель ссылается на автора и источник заимствования материалов или отдельных результатов, а также отмечает обстоятельство использования результатов научных работ, выполненных лично и в соавторстве.

В целом следует отметить, что Левановым И.Г. выполнено крупное научное исследование в области совершенствования существующих и создания новых машин и механизмов высокой долговечности и надежности, обеспечения надежности объектов машиностроения, исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения, в том числе на основе компьютерного моделирования, получен и обработан значительный объём экспериментального материала, обоснована адекватность полученных теоретических положений и доказана эффективность внедрения разработанных идей, моделей, методик и алгоритмов в теорию и практику проектирования объектов машиностроения.

