

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента
Корнаева Алексея Валерьевича на диссертационную работу
Гаврилова Константина Владимировича «Повышение ресурса трибосопряжений
поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания снижением
гидромеханических потерь на трение», представленную на соискание учёной степени
доктора технических наук по специальностям
05.04.02 – «Тепловые двигатели»,
05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин»

Актуальность темы исследования

В работе рассматривается научная проблема снижения потерь на трение и износ в узлах трибосопряжений двигателей внутреннего сгорания. Эта проблема является перманентной и в ближайшем обозримом будущем не предвидится ее окончательного решения. Проблема снижения потерь на гидродинамическое трение в известной мере противоречива, так как гидродинамический режим возникает благодаря внутреннему трению в тонком смазочном слое. Поэтому актуальность темы исследования не вызывает сомнений. Автор разработал методологию и инструментальные средства в виде комплекса программ для расчета и оптимизации трибосопряжений, функционирующих в условиях жидкостного или граничного трения с учетом отклонений формы, неньютоновских свойств жидкостей и других факторов. Применение разработок позволяет существенно снизить потери на трение и износ в узлах трения двигателей внутреннего сгорания.

В пользу актуальности свидетельствует факт поддержки исследования грантами ФЦП, РФФИ, министерства науки и высшего образования. Практическая значимость исследования подтверждается успешно выполненными хозяйственными работами с крупными предприятиями региона.

Общая характеристика диссертационной работы

Исследование посвящено разработке и реализации методологии имитационного и оптимизационного математического моделирования гидродинамических трибосопряжений поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания.

Анализ содержания диссертации и публикаций автора свидетельствует о том, что основным подходом в моделировании является механика сплошных сред, в том числе гидродинамика, термодинамика, динамика твердых деформируемых тел. Дополнительно используются методы теории вероятностей и математической статистики, методы оптимизации. Вычислительные модели и программы расчета преимущественно основаны на применении метода конечных разностей, что вполне допустимо так как расчетные области предварительно преобразуются к простой форме. Например, уравнение для расчета полей давлений является двухмерным из-за интегрирования по толщине смазочного слоя и допущении о малости компоненты градиента давления в этом направлении. В стремлении повысить точность математического моделирования автор выбрал путь усложнения математических моделей объекта исследования путем учета большого количества процессов и эффектов. Этот путь сопряжен с резким усложнением вычислительных моделей, часто связан с введением ограничений и допущений, каждое из которых следует обосновывать. Исследователю необходимо находить баланс точности физического соответствия и вычислительной точности, а степень успешности выбора проверять экспериментально.

Автор выделяет в качестве базовых три взаимосвязанные задачи: моделирования динамики кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания с опорами жидкостного трения; расчета полей давлений в смазочных слоях трибосопряжений; расчета полей температур в смазочных слоях трибосопряжений. Первая задача сводится к задаче динамики твердого недеформируемого тела. Эта задача приводится к множеству обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, численное решение которых можно выполнить во многих программных комплексах и системах инженерного программирования, в том числе свободно распространяемых. Наибольшее внимание автор уделяет второй задаче. Разработанные математические модели гидродинамической смазки учитывают отклонения формы поверхностей трибосопряжений на макро- и микроуровне, в том числе искусственно созданные, баланс расходов жидкости в гидродинамических трактах, неньютоновские свойства смазочных материалов, явление кавитации в смазочном слое в области низких давлений. Предложены варианты алгоритмов итерационного численного решения уравнения Элрода. Также рассматривается возможность смешанного режима смазки с контактированием и деформированием трущихся поверхностей. Для моделирования процесса износа используется марковский подход вероятностного описания динамических процессов. Третья задача не выделяется отдельным пунктом содержания диссертации и имеет распределенный характер. В работе рассматриваются два основных типа

трибосопряжения: подшипник жидкостного трения и сопряжение «поршень-цилиндр». Больше внимание в работе уделяется подшипникам жидкостного трения, при этом динамике сопряжения «поршень-цилиндр» уделяется отдельная глава.

Экспериментальная часть работы выполнялась в нескольких лабораториях (Австрийский центр компетентностей в трибологии, лаборатория трибологии ИПМех РАН, лаборатория триботехники ЮУрГУ) и связана с исследованием интенсивности изнашивания трибосопряжений двигателей внутреннего сгорания и реологических свойств смазочных материалов.

В заключительной главе представлена методика решения задач многокритериальной оптимизации с целями повышения несущей способности опор коленчатого вала, снижения потерь на трения и другими.

В целом, диссертация представляет собой законченное научное исследование. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание.

Степень обоснованности, достоверность и новизна выносимых на защиту научных положений

Научная новизна диссертационной работы выражается в 6 пунктах, содержательная часть которых соответствует областям исследований паспортов научных специальностей 05.04.02 – «Тепловые двигатели», 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин». Научная новизна преимущественно обусловлена применением известных методов к исследованию новых объектов и процессов.

Пункт 1 научной новизны обозначает метод расчета динамики и смазки гидродинамических трибосопряжений с учетом геометрии поверхностей трения на разных масштабных уровнях, а также установленные зависимости между параметрами макро- и микрогеометрии и результатами расчетов. Обоснованность применения метода и достоверность установленных зависимостей были подтверждены результатами вычислительных и физических экспериментов для частных случаев.

Пункт 2 связан с разработкой математической модели динамики контактного взаимодействия шероховатых поверхностей на основе теории марковских цепей. Модель простейшим образом описывает физику процесса трения и износа, но имеет теоретическую значимость и возможность дальнейшего развития.

Пункт 3 уточняет методику моделирования смазочной системы двигателя внутреннего сгорания применением алгоритма сохранения массы, описывает

итерационную процедуру решения сопряженных задач и позволяет повысить точность алгоритма решения по сравнению с базовым.

Разработанная методика расчетной оценки ресурса трибосопряжений, представленная в пункте 4 научной новизны, была в достаточной мере проверена автором экспериментально.

Пункт 5 уточняет энергетическую модель трения и изнашивания путем совместного учета молекулярно-механической и энергетической моделей изнашивания, и позволяет повысить точность разработанной модели по сравнению с базовой.

Пункт 6 научной новизны, связанный с разработкой методологии трибологического анализа гидродинамических трибосопряжений, является объединяющим для результатов всей диссертационной работы.

В целом, новизна выносимых на защиту положений не вызывает сомнений.

Степень обоснованности, достоверность и новизна выводов и рекомендаций

Общие выводы и рекомендации по результатам работы включают 8 пунктов. Выводы получены на основе разработанных автором математических моделей и проведенных автором вычислительных и физических экспериментов, поэтому их новизна не вызывает сомнений.

Выводы 1 и 2 свидетельствуют о разработке методологии трибологического анализа гидродинамических трибосопряжений в целом и метода расчета полей давлений в смазочном слое в частности, и имеют констатирующий характер.

В выводе 3 представлена количественная оценка эффектов влияния искусственной регулярной микрогеометрии на величины потерь на трение и несущую способность смазочного слоя. Однако оценка этих эффектов теоретическая.

Вывод 4 имеет теоретическую значимость. Разработанная вероятностная модель может быть развита в дальнейшем с применением искусственных нейронных сетей и алгоритмов обучения с подкреплением (от англ. reinforcement learning) для моделирования марковских процессов.

Вывод 5 показывает эффективность применения алгоритма сохранения массы путем экспериментальной проверки результатов расчета.

Выводы 6 и 7 сообщают об усовершенствовании в ходе диссертационного исследования энергетической модели трения и изнашивания, а также о разработке

алгоритма и программы расчета гидродинамики сложнонагруженных трибосопряжений. Выводы описывают отличительные возможности разработок.

Вывод 8 предоставляет количественную оценку и значимый положительный эффект оптимизации трибосопряжений конкретных дизельных двигателей. При этом из вывода не ясно, является ли эта количественная оценка теоретической или фактической.

Анализ публикаций автора по теме исследования и оценка авторского вклада

Опубликованные автором работы в полной мере отражают содержание диссертации. Соискателем в соавторстве было опубликовано по теме исследования 3 монографии, около 50 статей, включая 17 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и более 10 статей в изданиях, входящих в базы «Scopus» и «Web of Science». Некоторые исследования проводились совместно с другими лабораториями, что положительно сказалось на уровне публикаций. В частности, соискателем в соавторстве с коллегами из Института проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук было подготовлено 2 статьи, опубликованных в высокорейтинговых журналах.

Разработанные методы и полученные результаты докладывались на научных конференциях по проблемам машиноведения, триботехники и смежных областей.

Авторский вклад отражают научная новизна и выносимые на защиту положения. Диссертационная работа полностью отвечает пункту 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Замечания по диссертационной работе

1. Многие авторы современных статей по тематике исследования для решения сложных краевых задач используют известные CAE-системы, например, «ANSYS», «COMSOL». Эти системы имеют широкие возможности для решения задач газо- и гидродинамики с учетом сложной реологии, многофазности, турбулентности, теплообмена, совместной деформации, химических реакций и других факторов. В частности, программный модуль «Tribol-X» комплекса «ANSYS» является инструментом решения трехмерных эластогидродинамических задач для смешанного и гидродинамического режимов трения. Не ясно, почему возможность решения задач

данного исследования с помощью известных CAE-систем не была рассмотрена в обзорной части диссертационной работы.

2. В работе существенное внимание уделяется задаче расчета полей давлений в смазочном слое с учетом макро- и микроотклонений формы поверхностей, неньютоновских свойств смазочного материала и других особенностей функционирования трибосопряжений, что отражено в пп. 1, 3 научной новизны. Следовало бы более четко обосновать необходимость учета этих особенностей и подтвердить правильность их формализации. В частности, как сильно влияют неидеальность формы поверхностей и нелинейные вязкоупругие свойства жидкости на поле давлений в смазочном слое и насколько справедливы при этом допущения о стационарности течений в уравнении (2.69) и о равенстве ненулевых компонент тензора скоростей деформаций в выражении (2.71)?

3. Результаты расчета полей давлений, изображенные в диссертации на рисунках (3.23), (3.25) - (3.30), (3.32), (3.34), а также в автореферате на рисунках (8, б), судя по изображениям имеют области резкого изменения профиля поля давлений, в которых градиент функции давления не определен. Следовательно, в этих областях не определена и скорость течения жидкости. Также для описания гидродинамического трения в подшипниках с канавками автор не учитывал особенностей течения жидкости в областях с резким изменением профиля, связанных с возможными завихрениями потока, зонами застоя, которые могли существенно повлиять на поле давлений в смазочном слое.

4. В тексте диссертации не вполне подробно представлено описание программной реализации моделей контактного взаимодействия поверхностей трения.

5. Не вполне ясно, почему автор выбрал постановку многокритериальной оптимизации, которая является менее строгой математически, чем однокритериальная оптимизация, например, по критерию минимума потерь энергии на трение?

6. Автором выполнена большая теоретическая и экспериментальная работа, однако по тексту диссертации сложно установить связь пунктов научной новизны и выводов с результатами конкретных экспериментов. Базовые модели сравниваются с результатами других авторов, однако новые требуют экспериментальной проверки.

7. Приведенные в диссертации формулы преимущественно не имеют ссылок, поэтому иногда сложно определить какие из них были ранее известны, а какие являются новыми. Автору следовало бы уделить большее внимание цитированию первоисточников при построении математических и вычислительных моделей, введении допущений.

Отмеченные замечания не снижают существенно научной значимости диссертационной работы.

