

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Корнаева Алексея Валерьевича на диссертационную работу Иззатуллоева Мубориза Акрамхоновича на тему «Оптимизация микрогеометрических параметров гидродинамических трибосопряжений поршневых машин», представленную в диссертационный совет Д.212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» для публичной защиты на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин» (технические науки)

### **Актуальность темы исследования**

Проблема снижения потерь на трение в узлах машин остается актуальной на всех этапах развития машиностроения, в том числе на современном этапе. Уменьшение потерь на трение в основных трибосопряжениях двигателей внутреннего сгорания, таких как поршень-цилиндр и подшипник – коленчатый вал, является важной научной задачей. К основным путям снижения потерь на трение можно отнести совершенствование смазочных материалов, материалов трибосопряжений или модификацию их поверхности. В данной работе исследуется возможность снижения трения за счет модификации микрогеометрии поверхностей трения. Микротекстурирование поверхностей трения представляет интерес для отечественных и зарубежных исследователей, ежегодно по этой теме публикуется значительное количество работ в ведущих мировых научных изданиях.

В связи с этим тема рассматриваемой диссертационной работы представляет научный и практический интерес. Практическая значимость исследования подтверждается внедрением методических и программных разработок на крупном предприятии региона.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Исследование сопряжено с имитационным и оптимизационным математическим моделированием гидродинамических трибосопряжений 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 тел. Для решения задачи многокритериальной оптимизации используется метод ЛП-поиска. Разработанные вычислительные модели и программы основаны

на многолетнем опыте разработок программного обеспечения расчета и оптимизации узлов гидродинамического в научной школе триботехники Южно-Уральского государственного университета, однако имеют отличительные части, отраженные в пунктах научной новизны.

Автор выделяет в качестве базовой научную задачу разработки методики оптимизации гидродинамических сопряжений с микротекстурированными поверхностями трения, а в качестве мало изученных вопросов выделяет необходимость учета нестационарности процесса гидродинамической смазки и кавитации при оптимизации трибосопряжений с микротекстурированием поверхностей трения.

В качестве гидродинамических трибосопряжений в работе рассматриваются пары «ротор-подшипник жидкостного трения» и «поршень-цилиндр». Модели динамики подвижных частей трибосопряжений основаны на уравнениях движения центров масс под действием внешних сил и сил инерции. Расчет гидродинамических сил выполняется решением модифицированного уравнения Элрода с граничными условиями Якобсона-Флоберга-Ольсона. В модели гидродинамического трения основное внимание уделяется учету отклонений форм поверхностей трения на макро- и микроскопическом уровнях. Учет отклонений формы выполняется с помощью функции зазора в уравнении Элрода.

Экспериментальная часть работы выполнялась в лаборатория триботехники Южно-Уральского государственного университета и была сопряжена с совершенствованием машины трения ИИ 5018 и изготовлением текстурированных подшипников. Основное внимание уделялось определению коэффициента трения в трибосопряжении при различных способах микротекстурирования. Получен значимый эффект снижения трения за счет микротекстурирования поверхности подшипника. Подобные положительные эффекты получены в результате серии вычислительных экспериментов для трибосопряжений «ротор-подшипник» и «поршень-цилиндр». Для расчетного анализа радиальных подшипников скольжения на базе разработанных методик создана программа трибологического анализа «Микрогеометрия трибосистемы «вал-вкладыш» двигателя внутреннего сгорания». Для расчетного анализа гидродинамического трибосопряжения «направляющая поршня – цилиндр» ДВС на базе разработанной методики расчетного анализа трибосопряжений с поступательным движением подвижных элементов была создана программа трибологического анализа «Микрогеометрия трибосистемы «поршень – цилиндр».

В заключительной главе представлена методика решения задач многокритериальной оптимизации с целями повышения несущей способности смазочного слоя, снижения потерь на трение и другими. Решения определялись на множестве допустимых значений входных

параметров. В заключительном параграфе предложены мероприятия по снижению потерь в радиальных подшипниках скольжения.

Диссертация написана грамотным техническим языком с использованием общепринятой терминологии и обозначений. Стил ь изложения ясный и четкий, соответствующий требованиям, предъявляемым к научно-исследовательским работам. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК к кандидатским диссертациям. Замечаний по оформлению диссертации и автореферата нет.

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 2 пунктах, содержательная часть которых соответствует областям исследований паспорта научной специальности 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, связанный с разработкой методики многокритериальной оптимизации с использованием ЛП – поиска для параметров регулярной микрогеометрии поверхности сложнагруженных трибосопряжений, объединяет все этапы имитационного и оптимизационного моделирования, представленные в диссертации.

Пункт 2 научной новизны постулирует установление зависимостей между рабочими и геометрическими характеристиками трибосопряжений, которые могут быть использованы при проектировании энергоэффективных узлов трибосопряжений.

В целом, новизна выносимых на защиту положений не вызывает сомнений. Достоверность положений научной новизны обеспечивается согласованием результатов вычислительных и натурных экспериментов, а также внедрением результатов исследования на производстве.

### **Степень обоснованности, достоверность и новизна выводов и рекомендаций**

Общие выводы и рекомендации по результатам работы включают 5 пунктов. В целом, они имеют констатирующий характер. Выводы получены на основе разработанных автором математических моделей и проведенных автором вычислительных и физических экспериментов, поэтому их новизна не вызывает сомнений.

Вывод 1 коррелирует с пунктом 1 научной новизны и свидетельствует о разработке методики расчета трибосопряжений с учетом микротекстурирования поверхностей трения, позволяющей повысить энергоэффективность трибосопряжений.

Вывод 2 постулирует разработку программного обеспечения для расчета основных характеристик радиальных подшипников жидкостного трения с микротекстурированием.

Вывод 3 свидетельствует о качественном согласовании результатов натуральных и вычислительных экспериментов.

Выводы 4, 5 имеют теоретический характер и дают количественную оценку применения результатов исследования при проектировании трибосопряжений типа «поршень-цилиндр» и «ротор-подшипник» для конкретных машин.

Выводы 2, 4, 5 имеют практическую значимость, что подтверждается актом внедрения на предприятии.

Применение разработанных методического и программного обеспечения для расчета сложнагруженных подшипников позволяет оценить влияние на их рабочие характеристики конструктивных факторов, в том числе связанных с микротекстурированием поверхностей трения, обосновать рекомендации по совершенствованию основных гидродинамических трибосопряжений поршневых машин.

#### **Анализ публикаций автора по теме исследования и оценка авторского вклада**

Опубликованные автором работы в полной мере отражают содержание диссертации. По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, включая 2 статьи в научных сборниках и журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в изданиях из базы данных Scopus, получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты доложены и обсуждены на конференциях различного уровня: «15th International Conference on Tribology» (Kragujevac, Serbia, 17-19 May 2017), «13th International Conference on Tribology, BULTRIB '18» (October 25-27, 2018, Sofia, Bulgaria), «XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018)»: (Москва, 20-23 ноября 2018)», на ежегодных научных конференция аспирантов и докторантов и конференциях профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (Челябинск, 2017 – 2020).

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. Целью исследования является оптимизация параметров узлов гидродинамического трения для увеличения их несущей способности и снижения потерь на трение. Возможна ли альтернативная постановка цели, при которой критерием оптимизации является минимум потерь на трение, а необходимая величина несущей способности учитывается в ограничениях?

2. Переход к микроуровню моделирования может быть сопряжен с проблемой ограниченной применимости моделей гидродинамики. И хотя автор в достаточной мере ссылается на результаты решения подобных задач другими исследователями и сопоставляет полученные результаты с результатами эксперимента, вопрос применимости подхода механики сплошных сред следовало бы рассмотреть.

3. В обзорной части диссертации существенное внимание уделено вопросу возникновения явления кавитации в областях микронеровностей поверхностей трения. Однако в основных главах диссертации математических моделей возникновения кавитации в областях микронеровностей не рассматривается.

4. Численный анализ процесса гидродинамического трения, условий возникновения кавитации и других гидродинамических явлений в областях микронеровностей требует задания расчетной сетки, шаг которой хотя бы на порядок меньше размера микронеровности. Для решения подобных задач зачастую применяют адаптацию расчетной сетки. В диссертации вопросам численной реализации моделей уделяется недостаточно внимания, а результаты расчетов приводятся без подробного описания параметров вычислительных моделей.

5. Несмотря на то, что в работе используется известный метод ЛП-поиска, формализацию предложенной методики оптимизации следовало бы представить более полно, а также больше внимания уделить вопросу верификации результатов, например, сравнением с решением подобных задач однофакторной оптимизации.

6. В основном тексте диссертации и в выводах по работе не удалось обнаружить объяснения причин возникновения положительных эффектов применения микротекстурирования, связанных с повышением несущей способности и снижением потерь на гидродинамическое трение.

7. Пункт 1 основных результатов работы и выводов постулирует обеспечение снижения потерь на трение в узлах трибосопряжений в условиях жидкостного, смешанного и граничного трения, при этом разработанные математические модели учитывали только гидродинамический режим трения.

Возникшие замечания не снижают существенно научной значимости диссертационной работы.

