

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., профессора Савина Л.А.

о диссертации Усова Павла Павловича на тему:

«Обеспечение несущей способности узлов трения на стадии проектирования моделированием гидродинамических процессов с учетом деформаций»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах

Актуальность и значимость проведенных исследований

Несмотря на достаточно длительный период становления теории гидродинамической смазки, имеют место недостаточно изученные физические явления в смазочных пленках, в частности, влияние сложной реологии, 3D-моделирование, фазовые превращения, турбулентность, критические течения смазочных материалов и другие. Задачи упруго-гидродинамической (УГД) смазки, реализующиеся в условиях высоких температур, больших нагрузок и деформаций, считаются наиболее сложными с точки зрения моделирования. Следует отметить, что рассматриваемая диссертация является одной из немногих работ классического уровня по теории УГД-смазки за последние десятилетия. Объектами исследования являются три вида наиболее распространенных узлов трения - подшипники жидкостного трения, зубчатые передачи и роликовые подшипники. Тематика диссертационного исследования связана с обеспечением несущей способности трибосопряжений на стадии проектирования с учетом взаимного влияния гидродинамических, упругих и тепловых процессов, что позволяет повысить точность расчетов, имеет значение для повышения эффективности оборудования и снижения затрат на ремонт. Основное внимание в вопросах применения тяжело нагруженных подшипников скольжения с УГД-смазкой автор уделил элементам прокатных станов, что было и остается достаточно актуальным для обеспечения качества продукции, надежности оборудования и производительности технологических процессов. При этом особую научную значимость имеют проведенные соискателем исследования гидродинамических подшипников при движении ротора из состояния покоя и реверсивном режиме работы, при которых в условиях присутствия смазочного материала происходит переход от граничной к жидкостной смазке. В последнее время решение проблем УГД-смазки стало в значительной мере актуальным в связи с бурным развитием ветроэнергетики, в частности, при создании перспективных мощных (7...25 МВт) ветровых генераторов, в приводах вращения которых для обеспечения длительного ресурса при переменных режимах вращения и больших нагрузок используют подшипники скольжения. Опоры осей сателлитов планетарных мультипликаторов в приводах ветровой турбины воспринимают радиальные нагрузки более 1 МН, а при использовании косозубых зубчатых передач действуют также осевые силы и изгибающие моменты, вызывающие деформации опорных элементов сравнимые с толщиной смазочного слоя. В этих условиях формируется развитый режим УГД-смазки. Таким образом, тема диссертации соответствует современным технологическим направлениям и имеет важное значение для дальнейшего развития теории гидродинамической смазки.

Научная новизна диссертационного исследования в полной мере соответствует пункту 4.10 паспорта научной специальности 2.5.3 и представлена для следующих объектов с УГД-взаимодействием: 1) радиальных и осевых подшипников жидкостного трения; 2) реализующегося в зубчатых передачах и роликовых подшипниках линейного контакта.

1. Разработаны теоретические положения для расчета несущей способности, минимальной толщины смазочного слоя и максимальной температуры в радиальном подшипнике скольжения при неполном угле охвата с учетом тепловых процессов и упругих деформаций опорных поверхностей. Предложен метод совместного численного решения уравнений гидродинамической теории смазки, термодинамики и теории упругости, позволяющий значительно расширить область и точность УГД-расчетов тяжело нагруженных крупногабаритных гидродинамических подшипников при различных значениях давлений в диапазоне от 1 до 26 Мпа. Установлено, что в зависимости от угла охвата, коэффициента податливости и относительной минимальной толщины смазочного слоя несущая способность может изменяться в несколько раз. Были отмечены зоны изменения относительного минимального зазора, в которых учет упругих деформаций не оказывает значительного влияния на гидродинамические реакции несущего слоя. Для проведения анализа реверсного режима функционирования ГДП: 1) сформирована и реализована модель расчета максимального периода процедуры реверса; 2) установлен эффект уменьшения объема вытекания смазочного материала из радиального зазора при скорости скольжения менее 5% от максимального значения вследствие упругих деформаций; 3) влияние деформаций на максимальный период реверсивного жидкостного режима определяется критерием, величина которого зависит от коэффициента нагруженности, минимальной толщины смазочного слоя и коэффициента податливости. Разработана и верифицирована методика расчета подшипников валков прокатных станов в широком диапазоне нагрузок и скоростей.

2. Для случая локального линейного контакта разработана математическая модель формирования смазочного слоя при движении из состояния покоя с учетом деформаций поверхностей трения и упругости смазочного материала. Выявлены закономерности изменения максимального давления в смазочном слое от нагрузочной способности, геометрических размеров, скорости движения поверхностей и свойств смазочного материала. Установлены области максимальных значений давлений в смазочном слое, соответствующих условию отсутствия смазки (давление по Герцу), а также зоны с давлениями в 1.6 раза больше этих значений.

3. Деформации поверхностей трения могут более чем в 2 раза уменьшить высоту микронеровностей профиля в области высокого давления, что позволяет более точно прогнозировать износостойкость узлов трения. Упругие свойства смазочного материала способствуют повышению толщины формируемого смазочного слоя до полного разделения поверхностей, а далее не оказывают существенного влияния на процесс трения.

Научные положения и выводы диссертации подтверждены численными расчетами, экспериментальными данными и практическим внедрением разработанных методик. Особого внимания заслуживает разработанная автором методика расчета максимального давления и минимальной толщины смазочного слоя в локальных контактах, которая учитывает второй пик давления, что ранее не рассматривалось в существующих методиках.

Научная значимость работы заключается в более точном учете взаимного влияния деформаций и тепловых процессов в сравнении с работами других авторов, что позволяет повысить эффективность расчетов при проектировании узлов трения, способствовать повышению надежности и долговечности транспортных систем, технологического и энергетического оборудования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в промышленном применении разработанных средств проектирования для повышения эффективности и надежности узлов трения, снижении затрат на эксплуатацию и ремонт, что привело к значительному экономическому эффекту. Представленные в работе акты внедрения свидетельствуют о применении полученных результатов на ряде промышленных предприятий. В частности, расчет гидродинамических опор валков прокатного оборудования с учетом упругих деформаций в АО «Русполимет» и АО «Выксунский металлургический завод» проводился с использованием программного обеспечения на основе рекомендованной соискателем методики; в центре перспективных решений АО «ПО «Муромский машиностроительный завод» для уточненной оценки параметров контакта зубьев цилиндрических передач была использована методика расчета линейного УГД-контакта.

Краткий анализ содержания диссертационной работы

Диссертационная работа включает пять глав. Одна из особенностей изложения материала связана с включением достаточно краткого обзора исследований по УГД-смазке в качестве раздела введения. В первую очередь здесь следует отметить недостаточное внимание рассмотрению зарубежных работ последних лет по упругогидродинамической смазке, что могло значительно усилить сравнительную оценку полученной в работе научной новизны.

В первой главе изложены математические модели и методики расчета радиальных и упорных подшипников жидкостного трения с учетом деформаций опорных поверхностей. Рассмотрены три модели плоских подшипников в зависимости от жесткости вала, антифрикционной втулки и корпуса. Реализован метод совместного численного решения уравнений гидродинамической смазки и уравнений контактных деформаций опорных поверхностей, расширяющий возможности УГД расчетов в диапазоне давлений от 1 до 26 Мпа, что позволит использовать при проектировании тяжело нагруженных и быстроходных подшипников. В работе недостаточно подробно проведено описание ограничений использованного метода, особенно что касается сходимости итерационных процессов при высоких нагрузках и скоростях. Стоит отметить, что подобные подходы уже использовались в работах других авторов, а новизна предложенного метода заключается в расширении области применения метода для реверсивных режимов. Установлены закономерности изменения несущей способности от коэффициента податливости. Представлена модель и численное решение неизотермической УГД задачи для радиального подшипника конечной длины. При этом следует отметить недостаточно полный учет нелинейных эффектов, связанных с зависимостью вязкости от температуры. Стационарные задачи теории смазки упругих тел при линейном локальном контакте рассмотрены во второй главе диссертации. Реализован метод численного решения УГД задач смазки при использовании материалов с неньютоновскими свойствами. Представлена методика расчета подшипника с учетом второго пика давления, что является наиболее значимым вкладом автора в современную трибологию. Учет второго пика давления, который может значительно превышать давление по Герцу, позволяет более точно прогнозировать контактную прочность узлов трения. Автору следовало бы более подробно

описать влияние второго пика давления на износостойкость узлов трения в условиях переменных нагрузок. Представлен также анализ влияния деформаций на шероховатость поверхностей в области высокого давления. В третьей главе рассмотрены нестационарные задачи УГД смазки, приведена методика расчета реверсивного режима работы гидродинамических подшипников прокатных станов. Проведено исследование влияния вязкоупругих свойств смазки на формирование смазочного слоя в контакте цилиндров при движении из состояния покоя. Полученные на основе обработки большого количества решений задач смазки деформируемых тел инженерные методики расчета гидродинамических подшипников представлены в четвертой главе. Данный подход позволяет определить минимальную толщину смазочного слоя в среднем сечении и на торцах подшипника, максимальную температуру в несущей зоне слоя, максимальное давление в локальном контакте при любых допустимых деформациях контактирующих поверхностей. В пятой главе проведено описание экспериментальных исследований крупногабаритных тяжело нагруженных подшипников, которые проводились на стенде Электростальского завода тяжелого машиностроения. Основная цель проведения опытов заключается в проверке адекватности разработанных теоретических положений по расчету характеристик подшипников скольжения конечной длины, а также инженерной методики расчета высокоскоростных и тяжело нагруженных гидродинамических подшипников. Следует отметить, что изложенная информация по проведению опытных исследований далека от совершенства, некоторые соображения на этот счет изложены в замечаниях.

Анализ выводов по диссертации

Изложенные в диссертации выводы по результатам проведенных теоретических исследований являются обоснованными и подтверждены данными промышленных экспериментов. В основе информации констатация факта о разработке уточненных математических моделей расчета параметров подшипников скольжения жидкостного трения конечной длины с учетом деформаций и тепловых процессов. Однако стоит отметить, что некоторые выводы, например, о влиянии деформаций на несущую способность подшипников требуют дополнительной экспериментальной проверки, особенно в условиях реальной эксплуатации. Необходимо также сформировать рекомендации по применению результатов исследований в других областях триботехники. В современной технике активно развиваются направления, связанные с использованием нанометрических материалов и аддитивных технологий, которые могли быть рассмотрены в диссертации для формирования перспективных направлений исследований. Диссертация Усова П.П. занимает важное место в современной трибологии, конкретно в области проектирования узлов трения с учетом деформаций и тепловых процессов. Работа вносит значительный вклад в развитие упругогидродинамической теории смазки и может быть использована для повышения надежности и долговечности оборудования в различных отраслях промышленности.

Замечания по материалам диссертационной работы:

1. Работа носит преимущественно теоретический характер, но при этом в материалах диссертации недостаточно подробно представлен важнейший компонент математического моделирования, от которого во многом зависит вид расчетных соотношений, метод решения и точность получаемых результатов, а именно, обоснование принимаемых допущений при формировании математических моделей. Считаю, что соискатель уделил недостаточно внимания описанию ограничений разработанных моделей, следовало представить

информацию о предельных значениях нагрузок и скоростей, при которых расчеты могут давать неточные результаты.

2. В акте внедрения АО «Производственное объединение «Муромский машиностроительный завод» (приложения Б, стр. 356) указан ряд принятых к использованию методических рекомендаций, в частности, необходимо объяснить, каким образом (на основании каких определяемых показателей работоспособности) с использованием полученных результатов исследования обеспечивается «повышение точности прогнозирования долговечности и надежности зубчатой передачи»?

3. В представленных в 5-й главе материалах по экспериментальному исследованию крупногабаритных гидродинамических подшипников отсутствует информация о следующих компонентах: 1) элементной базе и точности показаний измерительных устройств; 2) процедуре математико-статистической обработки результатов опытных исследований; 3) методике измерения важнейшего показателя работы подшипников для УГД-режима смазки, а именно, минимальной толщины смазочного слоя.

4. Сопоставление результатов теории и эксперимента для линейного контакта в роликовых подшипниках проводилось только с использованием опытных данных других авторов (раздел 2.5, стр. 201-203), что требует обоснования адекватности условий функционирования и полученных результатов для проведения процедуры верификации.

5. Следует отметить невозможность применения полученных результатов при использовании других смазочных материалов вследствие ограниченного числа вариантов опытных испытаний, отсутствия анализа применения современных синтетических масел, жидкостей с различными наноструктурированными добавками, а также соответствующих безразмерных параметров.

Полагаю, что некоторые указанные замечания связаны, прежде всего, с недостаточно полным сбором соискателем имеющейся в технических отчетах по выполнению хозяйственных работ с предприятиями информации и полученных практических результатов, что во многом определяется структурными изменениями в промышленности РФ в период перестройки 90-х годов. В первую очередь, это касается проведенных с участием соискателя на предприятиях экспериментальных исследований и процедуры верификации разработанных теоретических положений. Анализ опубликованных научных работ, первые из которых появились почти полвека назад, причем в соавторстве с признанными классиками гидродинамической смазки и теории трения (Коровчинский М.В., Галахов М.А. и другие), а также участие соискателя в качестве ответственного исполнителя при выполнении в течение более 40 лет многих НИОКР с промышленными предприятиями и в рамках различных научных программ и грантов, в планах работ которых были как теоретические, так и экспериментальные натурные исследования, свидетельствуют о высоком уровне проведенных исследований и полученных результатов. Автором решена научная проблема, имеющая важное значение в решении актуальных технических задач повышения эффективности, надежности, долговечности тяжело нагруженных и высокоскоростных узлов трения скольжения.

Заключение по диссертации

Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на высоком научном уровне, имеет актуальный характер, содержит новые теоретические и практические результаты, которые имеют важное значение для развития промышленности. Работа содержит новые подходы решения важной научно-технической проблемы обеспечения несущей способности узлов трения в условиях высоких нагрузок, температур и деформаций. Полученные результаты достоверны, выводы обоснованы. С учетом фундаментального характера поставленных задач и уровня полученных научных результатов можно утверждать, что рассматриваемая диссертационная работа соответствует установленным требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени доктора технических наук и направлениям паспорта специальности.

Считаю, что диссертационная работа Усова П.П. на тему «Обеспечение несущей способности узлов трения на стадии проектирования моделированием гидродинамических процессов с учетом деформаций» соответствует специальности 2.5.3. – «Трение и износ в машинах», имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 23.09.2013 года, а её автор – Усов Павел Павлович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук.

Доктор технических наук по специальности 01.02.06

«Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры,

Заслуженный деятель науки РФ,
профессор кафедры мехатроники,
механики и робототехники

Орловского государственного
университета имени И.С. Тургенева
Савин Леонид Алексеевич

Савин Л.А.

27.02.2025.

Подпись Л.А. Савина Л.А. подтверждаю:

и.о. проректора по научно-технологической деятельности

и аттестации научных кадров ФГБОУ ВО

«ОГУ имени И.С. Тургенева»

д-р. техн. наук, профессор

Радченко С.Ю.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева». Сокращенное наименование: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». Почтовый адрес: 302026, г. Орел, Комсомольская ул., 95. Телефон (факс): (4862) 751-318, e-mail: info@oreluniver.ru