

ОТЗЫВ

официального оппонента по диссертационной работе **Усова Павла Павловича** на тему «Обеспечение несущей способности узлов трения на стадии проектирования моделированием гидродинамических процессов с учетом деформаций» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах».

1.Актуальность работы

Отказы узлов трения являются одной из главных причин выхода из строя современной техники. Узлы трения, работающие в гидродинамическом режиме, в котором поверхности трения разделены слоем смазочного материала необходимой толщины, имеют широкое применение в технике.

При высоких нагрузках значительное влияние на рабочие характеристики этих узлов оказывают деформации поверхностей трения. По этой причине, для обеспечения требуемого ресурса проектируемой тяжело нагруженной опоры скольжения, необходимо производить расчеты с учетом деформаций.

Несмотря на большое количество работ в области гидродинамической смазки, отсутствовала методика расчета опор скольжения учитывающая деформации поверхностей трения при высоких нагрузках, что в значительной мере обусловлено сложностью совместного решения уравнений гидродинамики смазочного слоя и уравнений контактных деформаций. Не было также методики расчета опор жидкостного трения реверсивных прокатных станов с учетом деформаций опор, методики расчета максимального давления с учетом второго пика давления в смазочном слое.

На основании этого тема рассматриваемой диссертационной работы Усова П.П., посвященная моделированию гидродинамических процессов с учетом деформаций, является актуальной.

2.Новизна исследований и полученных результатов

Автором диссертации предложен метод совместного численного решения уравнений описывающих деформацию контактирующих тел и движения смазочного слоя, Метод расширяет область применения упругогидродинамических (УГД) расчетов, по сравнению с известными ранее: от малых деформаций при давлении до 1 МПа до высоких деформаций при давлении до 26 МПа, характерных для тяжело нагруженных крупногабаритных подшипников.

Разработана уточненная неизотермическая математическая модель расчета радиального подшипника скольжения с учетом его деформаций.

Проведено численное исследование влияния деформаций контактирующих тел на несущую способность подшипника. Установлены новые закономерности в зависимости несущей способности от коэффициента податливости, характеризующего уровень деформаций. Исследовано влияние деформаций на период движения опор скольжения жидкостного трения в реверсивном режиме.

Для условий локального линейного контакта выявлены закономерности изменения максимального давления в смазочном слое от нагрузочной способности, геометрических размеров, скорости движения поверхностей и характеристик смазочного материала. Разработана математическая модель процесса формирования смазочного слоя при движении из состояния покоя с учетом упругости смазочного материала и упругих деформаций поверхностей трения. Определены условия, при которых давление в смазочном слое близко к максимальному значению, как при отсутствии смазки (давление по Герцу), так и условия, при которых давление в смазочном слое выше давления по Герцу более чем в 1.6 раза.

3. Практическая значимость работы

Разработанная методология расчета гидродинамических подшипников скольжения с учетом деформаций поверхностей трения позволяет на стадии проектирования определить предельную несущую способность подшипника, обеспечивающую работу в жидкостном режиме трения.

Разработанная методология расчета характеристик линейного упруго-гидродинамического контакта позволяет на стадии проектирования производить уточненные расчеты нагрузочной способности зубчатых передач, роликовых подшипников качения и других узлов трения с линейным локальным контактом, работающих в гидродинамическом режиме.

Результаты исследований автора внедрены в АО «Русполимет» с годовым экономическим эффектом 2.3 миллиона рублей, в Центре разработки перспективных решений АО «ПО «Муроммашзавод» с ожидаемым годовым экономическим эффектом 1.3 млн. рублей и в Инженерно-технологическом центре АО «Выксунский металлургический завод».

4. Содержание диссертации

Диссертация включает пять глав, заключение, список литературы из 154 наименований. Объем диссертации 356 страниц и содержит 151 рисунок и приложение. Содержание соответствует Паспорту научных специальностей ВАК по специальности 2.5.3. – Трение и износ в машинах, п. 4 и п.10.

Во введении обоснована актуальность темы работы, научная новизна и практическая значимость результатов. Сформулирована цель работы. Приведен обзор литературы по данной тематике.

В первой главе рассмотрены задачи теории смазки радиальных упорных подшипников скольжения с учетом деформаций поверхностей трения.

Предложен метод совместного численного решения уравнений контактных деформаций и движения смазочного слоя. Приведены новые решения УГД задач и проведен их анализ. Установлены закономерности в зависимости несущей способности радиального подшипника от коэффициента податливости, учитывающие уровень деформаций контактирующих тел.

Изложен метод численного решения пространственной неизоотермической УГД задачи смазки радиального подшипника скольжения. Путем обработки большого количества выполненных численных расчетов получены семейства кривых, по которым можно определять минимальную толщину смазочного слоя в торцах подшипника после решения плоской неизоотермической задачи.

Рассмотрена УГД задача для упорного подшипника скольжения. Получены решения и проведен их анализ.

Во второй главе рассмотрены стационарные задачи однородных тел при локальном контакте.

Получены решения задач о смазке однородных упругих и вязкоупругих тел, а также тел с покрытиями из упругих и вязкоупругих материалов в широких интервалах изменения коэффициента жесткости и вязкоупругих параметров. Проведен анализ полученных решений. Определены условия, при выполнении которых максимальное давление в смазочном слое превышает более чем в 1,6 раза давление, определяемое по теории Герца и используемое при расчетах на контактную прочность.

Приведено сопоставление результатов расчета минимальной толщины смазочного слоя в смазываемом контакте упругих тел с известными экспериментальными результатами. Сопоставление показало хорошее совпадение теории и эксперимента.

Приведены примеры расчета узлов трения.

В третьей главе рассмотрены нестационарные задачи упруго-гидродинамической теории смазки.

Проведено исследование влияния вязкоупругих свойств смазки на процесс формирования смазочного слоя в локальном контакте цилиндров при движении из состояния покоя. Рассмотрен реверсивный режим работы подшипника скольжения. Исследовано влияние деформаций на максимальный период реверсивного движения, при котором обеспечивается режим жидкостного трения.

В четвертой главе приведены инженерные методики расчета гидродинамических узлов трения, полученные путем обработки а решений задач смазки деформируемых тел.

1. Инженерная методика расчета опор валков прокатных станов. Методика позволяет определить минимальную толщину смазочного слоя в среднем сечении, перпендикулярном оси подшипника, минимальную толщину смазочного слоя в торцах подшипника и температуру смазки на входе в рабочий зазор и максимальную температуру в смазочном слое.

2. Инженерная методика расчета локального УГД контакта. Методика позволяет определить минимальную толщину смазочного слоя и максимальное давление в локальном контакте в широком интервале значений коэффициента жесткости.

В пятой главе описаны экспериментальные следования подшипника серийного изготовления ЭЗТМ. Приведено сопоставление результатов проведенных экспериментов и опубликованных экспериментальных данных и результатов расчетов.

В приложении приведены коды запрограммированных в МатЛаб инженерных методик, использующих решение нелинейного алгебраического уравнения и семейств графиков.

5. Вопросы и замечания по работе

1. **Стр (7).** « Условием гидродинамического режима является превышение минимальной толщины смазочного слоя в 3...5 раз суммарной высоты микронеровностей» .
- На основании каких исследований и измерений минимальной толщины смазочного слоя в узле трения получено данное требование?
2. **Стр (15), (внизу).** Каким образом получено и подтверждено, что при угле охвата $2\pi/3$ при значении $N_{мин} = 0,1$ несущая способность повышается в два раза, а при $N_{мин} = 0,01$ более чем в 9 раз?
3. **Стр. (17), п 1.** Следовало бы дать определение «предельной несущей способности подшипника». Это – до момента нарушения режима жидкостного трения или до момента, когда происходит задир?

4. Стр. (17) п. 2. Есть ли экспериментальные доказательства, что зубчатые передачи работают в гидродинамическом режиме трения?
- Рассматривался ли в работе случай разрыва смазочного слоя и условия, ведущие к задиру?
5. Стр. 157-158. Показано, что деформации могут повышать толщину смазочного слоя в десятки раз, понижая при этом давление в десятки раз. При каких условиях это происходит? От каких значений до каких? Есть ли понятное физическое объяснение за счет чего это происходит?

6. Стр 158. *«Приведен пример показывающий, что введение упругого покрытия повышает минимальную толщину смазочного слоя в 51,4 раза, понижая при этом максимальное давление в 67,1 раз».*

Приведенный пример – это результат расчетов? Есть ли экспериментальные данные подтверждающие результат и объяснение этому явлению?

7. Стр 166. *« В результате коэффициент трения может возрастать».* При каких условиях это может происходить и какое дается объяснение?

8. Стр. 201-202 *Проведено сопоставление результатов расчета минимальной толщины смазочного слоя в контакте роликов с экспериментальными данными.*

Автор диссертации приводит ссылки на эксперименты в статье *Shibley*. Это надо понимать так, что своих подобных экспериментов автором диссертации не проводилось?

9. Стр 198-201. Какие основные выводы сделаны из исследования влияния неньютоновских свойств смазочных материалов?

10. Стр 266.

- Как получено, что период реверсивного движения в 78 раз выше значения, полученного без учета деформации и вращения вала?

11. стр.268. За счет чего в 29.7 раз меняется значение параметра k ?

12. стр. 269. Следовало бы дать определение и описание фронта, который образуют смазочные жидкости от начального момента движения, а также какое влияние на него оказывает упругие свойства смазочного материала;

13. Раздел « Сравнение экспериментальных и расчетных данных» .

Сравнение проводилось, в основном, по максимальной температуре смазочного слоя, измеряемой заделанными во втулку-вкладыш термопарами.

В ссылках на экспериментальные исследования по измерению толщины смазочного слоя целесообразно было дать информацию о степени участия автора диссертации в этих экспериментах.

6. Публикации, отражающие основное диссертации

Основное содержание диссертационной работы отражено в 50 публикациях автора, из которых 21 входят в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ, 12 публикаций в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science. Диссертант принимал участие более чем в 15 научных конференциях.

7. Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Диссертационная работа Усова П.П. соответствует паспорту специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах по пунктам: п.4 - Смазочное действие: гидро- и газодинамическая смазка, гидро- и газостатическая смазка, эластогидродинамическая смазка, смешанная смазка, граничная смазка; п.10 - Физическое и математическое моделирование процессов трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем.

8. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты работы будут представлять интерес организациям, занимающимся разработкой тяжело нагруженных узлов трения, работающих в гидродинамическом режиме.

9. Заключение

На основании экспертизы рассмотренной работы можно сделать вывод, что диссертационная работа Усова П.П. «Обеспечение несущей способности узлов трения на стадии проектирования моделированием гидродинамических процессов с учетом деформаций» является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне на актуальную тему, и содержит новые научные результаты. Проведенные автором исследования, посвященные изучению закономерностей в зависимостях несущей способности смазочного слоя, а также максимальной температуры и максимального давления в нем от уровня деформаций поверхностей трения, можно рассматривать как успешное решение важной научной проблемы обеспечения несущей способности узлов трения на стадии проектирования, внедрение результатов которой вносит заметный вклад в обеспечение надежности машин и механизмов.

Диссертационная работа Усова П.П. отвечает требованиям ВАК РФ (п.9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к докторским диссертациям.

Соискатель, Усов П.П. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах».

Официальный оппонент: научный консультант научно-образовательного центра Аспирантуры АО «ВНИИЖТ», доктор технических наук (05.02.04 «Трение и износ в машинах»), профессор.

Захаров Сергей Михайлович

«06» февраля 2025 г.

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

Почтовый адрес: 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д.10, стр.1

Телефон: +7 (499) 260-41-11, e-mail: info@vniizht.ru

Даю согласие на обработку персональных данных.

Подпись Захарова Сергея Михайловича заверяю:

Верно:

Начальник отдела управления
персоналом АО «ВНИИЖТ»
Темирбеков Р.Р.

АО * МОСКВА *