

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО

«Тверской государственной технической
университет», д.ф.-м.н., профессор

А.В. Твардовский

2021 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации «Тверской государственной технической университет» на диссертационную работу Мещеряковой Альмиры Рифовны «Контактное взаимодействие и накопление усталостных повреждений при качении деформируемых тел», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертации вытекает прежде всего из того факта, что многочисленные разнообразные по конструкции и назначению современные технические устройства содержат узлы, в которых осуществляется контактное взаимодействие при трении качения. Достаточно упомянуть такие узлы, как подшипники качения или пара трения колесо-рельс. Надежность и эффективность таких узлов обеспечивается прежде всего на стадии проектирования, что требует постоянного совершенствования соответствующих методик расчета с учетом свойств конструкционных и смазочных материалов и покрытий и конкретных условий эксплуатации. Для этого в настоящее время все чаще применяются достижения фундаментальных наук, в том числе механики деформируемого твердого тела. С этой точки зрения тема диссертационной работы А.Р. Мещеряковой, посвященной развитию методов решения контактных задач при трении качения, безусловно, актуальна. Косвенным подтверждением актуальности темы диссертационной работы служит финансирование выполненных автором исследований в рамках грантов РФФИ, РНФ и программы Президиума РАН, так как актуальность является одним из критериев при экспертизе заявки на указанное финансирование.

2. Краткий анализ содержания диссертации

Введение фактически представляет собой самостоятельную главу диссертации. Во введении традиционно обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи диссертации, аргументируется научная новизна и практическая значимость результатов работы, их достоверность и личный вклад автора. Также во введении

приведены положения, выносимые на защиту, и в кратком изложении описано содержание разделов диссертации.

Нетрадиционно во введении, а не в отдельной главе, приводится анализ современного состояния исследований по тематике диссертации. В этом есть определенная логика, поскольку данный анализ предшествует формулировке цели работы и постановке задач, решение которых необходимо для достижения цели.

Сформулированные во введении задачи исследования соответствуют заявленной цели, логически взаимосвязаны и служат ключевыми этапами на пути к достижению поставленной цели.

В той части введения, которая содержит обзор современного состояния исследований по тематике диссертации, рассмотрены отечественные и зарубежные публикации, посвященные изучению трех основных явлений, в которых по сути заключена природа сопротивления качению. Это потери энергии при относительном проскальзывании поверхностей в зоне контакта, диссипация энергии из-за несовершенной упругости материалов контактирующих тел и работа по преодолению сил молекулярного взаимодействия. Надо отметить, что в обзоре рассмотрены не только аналитические решения соответствующих контактных задач, но и алгоритмы численного расчета основных характеристик контакта в условиях трения качения. Список процитированных литературных источников, приведенный в диссертации, позволяет заключить, что их критический анализ дает вполне адекватное представление о решенных и нерешенных на данный момент научных проблемах, относящихся к теме диссертации.

В первой главе рассматривается качение абсолютно жесткой сферы по вязкоупругому слою на абсолютно жестком полупространстве. Такая постановка задачи соответствует, например, взаимодействию стальных тел качения и основания при наличии твердосмазочного покрытия и позволяет выявить влияние свойств материала покрытия на характеристики контакта. Определены распределение нормальных и касательных напряжений на площадке контакта, конфигурация областей сцепления и проскальзывания и величина интегральной силы сопротивления (точнее, отношение этой силы к нормальной нагрузке) в зависимости от характеристик вязкоупругих свойств покрытия, коэффициента контактного трения и параметров молекулярного взаимодействия.

Такой комплексный алгоритм расчета характеристик контакта качения составляет, на наш взгляд, **главный научный результат** первой главы.

Попутно хотелось бы сделать следующее замечание. При расчете характеристик контакта с учетом сил молекулярного взаимодействия для описания последних используется потенциал Леннарда-Джонса с показателями степени при безразмерной координате 3 и 9 (см. ф-лу (1.38) в диссертации и ф-лу (15) в автореферате для адгезионных напряжений или

давлений). Это соответствует показателям 2 и 8 в формуле для потенциала. Между тем традиционно в потенциале Леннарда-Джонса показатели степени принимаются равными 6 и 12 (его часто и называют «потенциал 6-12»). Чем вызвана необходимость отступления от традиционных значений показателей степени, автор не поясняет, а это следовало бы сделать. Есть ли в этом какой-то глубокий физический смысл?

Судя по рис. 7 и тексту на стр. 39 диссертации (рис. 4 в автореферате) в расчетах учитывалось только адгезионное взаимодействие вне области контакта. Рассматривалось ли адгезионное взаимодействие на площадке контакта и если нет, то чем аргументируется такое допущение?

Вторая глава занимает центральное место в работе. В этой главе, в развитие результатов предыдущей, делается следующий шаг, приближающий предлагаемую модель к реальным условиям контактирования: рассматривается качение упругой сферы по упругому основанию с вязкоупругим покрытием. Учитывается также относительное проскальзывание контактирующих тел, но не учитывается их молекулярное взаимодействие. Рассматривается самый общий случай проскальзывания: в продольном и поперечном относительно движения сферы направлениях и проскальзывание из-за верчения тела качения.

В расчетах используются различные модели вязкоупругого тела, представляющего тонкий поверхностный слой, однако выбор той или иной модели не аргументируется.

Основными новыми **научными результатами** второй главы, на наш взгляд, являются следующие:

- анализ распределения напряжений и относительных скоростей по площадке контакта в зависимости от величины относительного проскальзывания и его характера (наличия или отсутствия верчения), а также характеристик вязкоупругих свойств покрытия;

- анализ конфигурации и величины зон сцепления и проскальзывания в зависимости от относительного проскальзывания;

- анализ влияния относительного проскальзывания и характеристик вязкости покрытия на величину относительной силы сопротивления качению сферы.

В третьей главе на основании полученных ранее результатов (в главе 2) выполнен анализ напряженного состояния упругого полупространства с вязкоупругим покрытием в условиях трения качения. Определено положение точек с максимальными растягивающими, сжимающими и касательными напряжениями. Установлено, что при относительно большом значении коэффициента контактного трения и существенном относительном проскальзывании область максимальных касательных напряжений выходит на поверхность контакта. Наличие вязкоупругого покрытия снижает величину максимальных касательных напряжений в приповерхностных слоях.

Располагая значениями максимальных касательных напряжений с помощью эмпирической зависимости (3.2) (стр. 70 диссертации) можно рассчитать скорость накопления усталостных повреждений в материале упругого полупространства и далее рассчитать непосредственно функцию повреждаемости как функцию координат в зависимости от числа циклов нагружения. Превышение пороговых значений функции повреждаемости позволяет установить точки начала разрушения материала вследствие усталости. Однако примеры таких расчетов не приводятся.

3. Научная значимость результатов

С научной точки зрения наибольший интерес, на наш взгляд, представляют следующие результаты диссертации:

- комплекс методов и алгоритмов решений контактных задач о качении упругой сферы по упругому полупространству с вязкоупругим покрытием, учитывающих все источники сопротивления качению: относительное проскальзывание в зоне контакта, неидеальную упругость материалов и адгезионное взаимодействие контактирующих тел,

- комплексный анализ влияния характеристик поверхностного слоя и объемных характеристик компонентов пары трения, величины относительного проскальзывания, скорости движения катка, его радиуса и коэффициента контактного трения на характеристики контакта.

Эти результаты являются новыми, они развивают теоретические представления о процессах контактного взаимодействия при трении качения и позволяют наметить и обосновать пути управления этими процессами.

4. Практическая значимость результатов

Диссертация А.Р. Мещеряковой носит теоретический характер. Тем не менее, результаты исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, могут быть использованы при предварительном анализе и выборе смазочных материалов в узлах трения качения. Разработанные алгоритмы и программа расчета контактных характеристик в условиях качения упругих тел с учетом свойств промежуточного вязкоупругого слоя, на которую получено свидетельство о регистрации, могут быть использованы при создании систем автоматического проектирования узлов трения качения.

5. Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Выводы, сформулированные в диссертации, обоснованы и логично вытекают из результатов исследований автора. Исчерпывающая аргументация достоверности результатов исследования приводится соискателем в тексте диссертации и автореферате. Аргументация представляется убедительной и в дополнении не нуждается.

Тем не менее, косвенным подтверждением достоверности результатов диссертации можно считать публикацию части из них в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях. Кроме того, основные результаты диссертации были представлены на 9 международных и 10 всероссийских конференциях, поэтому научная общественность имела возможность ознакомиться и оценить результаты исследований соискателя. Наконец, надо отметить, что соискатель представляет авторитетную научную школу по механике контактного взаимодействия, подготовившую докторов и кандидатов наук по тематике диссертации.

Основные научные результаты диссертации, как уже отмечалось выше, являются новыми.

6. Замечания по диссертации

Помимо сделанных выше (см. п.2), по диссертации в целом имеются следующие замечания.

1. В третьей главе, вопреки заглавию, накопление усталостных повреждений при качении как таковое не анализируется. Как уже отмечалось, в главе 3 выполнен анализ напряженного состояния упругого полупространства с вязкоупругим покрытием в условиях трения качения и определены точки с максимальным касательным напряжением. Следовало бы на основании этих результатов привести пример расчета скорости накопления усталостных повреждений по формуле (3.2) и интегральной функции повреждаемости и затем провести их анализ, подобно тому, как это сделано в предыдущих главах.

2. С точки зрения практической значимости представляет интерес программа расчета контактных характеристик в условиях трения качения, на которую автором получено свидетельство о регистрации. Однако в диссертации, равно как и в тексте самого свидетельства, не содержится практически никакой информации о программе. Следовало бы привести сведения о входных параметрах программы, а также о форме представления результатов расчетов. Для программных продуктов также обычно приводятся сведения о тестировании программы и его результатах. Этого в диссертации также нет.

3. В диссертации не приводится обоснование числовых значений исходных параметров, на основании которых выполнены примеры расчетов характеристик контакта качения: толщины поверхностного слоя, радиуса катка, его скорости, упругих и вязкостных характеристик материалов и т.д. Полезно было бы указать, для каких реальных контактных узлов характерны использованные параметры. Например, в разделе 1.6 на стр. 39 диссертации указано, что расчет контактных характеристик выполнен для радиуса катка 200 нм. Насколько реально такое значение?

Имеется также несколько менее принципиальных замечаний.

1. В тексте диссертации и автореферата линейная зависимость касательных напряжений от нормальных $\tau = \mu\sigma$ именуется то законом Кулона-Амонтона (стр. 5, 27, 31, 32, 57 диссертации, стр. 13,19 автореферата), то просто законом Кулона (стр. 36, 46, 49, 76 диссертации). Соблюдая историческую справедливость и не умаляя при этом заслуг Ш. Кулона в изучении закономерностей трения, приведенную выше линейную зависимость $\tau = \mu\sigma$ правильнее называть законом Амонтона (см., напр., И.В. Крагельский и В.С. Щедров «Развитие науки о трении», Б.В. Дерягин «Что такое трение», В.Л. Попов «Механика контактного взаимодействия и физика трения»).

2. На стр. 36 диссертации в формуле (1.36) коэффициент μ_d назван безразмерной характеристикой, хотя на самом деле он имеет размерность длины и, как можно догадываться, представляет собой отношение момента сопротивления качению к нормальной нагрузке. Если это так, то именно эта величина (с размерностью длины) обычно трактуется как коэффициент трения качения по Кулону.

3. На стр. 21 и 22 диссертации ссылки на публикации соискателя не соответствуют нумерации последних в списке литературы в конце диссертации.

4. На стр. 17 и 64 тело качения названо роликом, хотя из текста следует, что это сферическое тело.

7. Заключение

Диссертационная работа А.Р. Мещеряковой является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему; она обладает научной новизной и практической ценностью. Работа выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в развитие представлений о закономерностях процессов контактного взаимодействия в условиях качения с проскальзыванием. Результаты, полученные автором, представляются достоверными, а сделанные в работе выводы – обоснованными.

Наличие замечаний естественно для любой научной работы, оно не изменяет общей положительной оценки диссертации и не снижает ее ценность.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в опубликованных научных работах, докладах на конференциях и семинарах. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и позволяет составить адекватное представление о выполненных исследованиях и полученных результатах.

Таким образом, диссертационная работа А.Р. Мещеряковой отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней» (п. 9 – п. 14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, соответствует паспорту специальности научных работников 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» (п. 7), а ее

автор Мещерякова Альмира Рифовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв на диссертационную работу А.Р. Мещеряковой рассмотрен и утвержден единогласно на расширенном заседании кафедры «Прикладная физика» Тверского государственного технического университета (протокол № 1 от 30.08. 2021 года).

Профессор кафедры «Прикладная физика»
ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет»
доктор технических наук, профессор



Владимир Васильевич Измайлов

30.08.21

170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22.

Тел. (4822)78-88-80, email: iz2v2@mail.ru

Подпись



УДОСТОВЕРЯЮ

Учёный секретарь Совета
Тверского государственного
технического университета

