ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Макиевой Элины Игоревны на тему: «Динамика тел, взаимодействующих с проскальзыванием и разрушением» по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Понимание механики контактного взаимодействия необходимо для построения адекватных математических моделей многих механических систем. Классическим примером таких систем являются системы с качением: они рассматриваются как в теоретических, так и в прикладных задачах. Результаты исследований таких систем служат научной базой, обеспечивающей функционирование разнообразных технических объектов (в частности, подвижного состава железных дорог) и, следовательно, выступают одним из стимуляторов технического прогресса. Таким образом, не вызывает сомнений **актуальность** диссертации Э.И. Макиевой, посвященной проблемам математического моделирования механических систем при наличии проскальзывания и разрушения контактирующих тел, а также изучению поведения промежуточной прослойки, образующейся между телами в результате разрушения. Помимо этого, применение используемого в диссертации «конструктивного подхода» к составлению уравнений динамики механических систем со связями представляет существенный интерес и является **актуальным** для специалистов в области теоретической механики. Этот подход можно применять не только для обоснования наложения связей в рамках классических формально-аксиоматических уравнений, но и для формирования новых неклассических математических моделей динамики. Конструктивный подход заключается в том, что предлагается рассмотреть свободную систему, на которую действуют дополнительные силы, а затем перейти к пределу, устремив коэффициенты инерции, жесткости, вязкости и т.д. к бесконечности. Если предел существует, то предельная система объявляется системой со связью, то есть с физической точки зрения системы со связями рассматриваются как предельные для свободных систем.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы, включающего 70 наименований.

Во **введении** дана общая характеристика работы, представлена ее структура, обоснованы актуальность и новизна темы диссертации, указаны степень проработанности, цели работы, теоретическая и практическая значимость, достоверность, даны сведения об апробации результатов и публикациях соискателя, кратко изложено содержание

диссертации, перечислены методы исследования, приведены основные результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации, наряду с обзором работ о реализации связей в системах с качением, подробно описывается и обосновывается построение приближенных уравнений движения систем с малым проскальзыванием и хрупким разрушением взаимодействующих тел на основе концепции «первичной связи», предложенной П. Дираком. Его областью интереса были системы с вырожденной матрицей кинетической энергии, встречающиеся в задачах теоретической физики. Как оказалось, подход П. Дирака к построению уравнений движения систем с вырождением обладает достаточной общностью и полезен во многих других ситуациях. Известно, что наличие промежуточной прослойки, возникшей в области контакта тел в результате разрушения, изменяет потенциальную энергию системы: в ее лагранжиане появляется слагаемое, пропорциональное квадрату относительного проскальзывания тел, по структуре аналогичное кинетической энергии «присоединенной массы» в вакономной механике. Применяя к полученной системе подход П. Дирака, Э.И. Макиева обнаружила, что при определенных условиях уравнения движения системы, в которой часть компонент обобщенных скоростей имеет такой же порядок малости, как и компоненты скоростей проскальзывания контактирующих тел, в пределе при стремлении относительного проскальзывания к нулю не переходят в уравнения промежуточной модели вакономной механики с условиями непроскальзывания. Предельной моделью служат уравнения с модифицированными первичными связями Дирака, в рамках которой проскальзывания тел сохраняются. В этой же главе приведены строгие оценки точности построенных приближенных моделей с помощью теорем А.Н. Тихонова, А.Б. Васильевой, В.Ф. Бутузова и Р.П. Кузьминой.

Далее в первой главе с использованием построенных теоретических моделей проводится исследование поперечных и угловых движений железнодорожной колесной пары при наличии промежуточной прослойки между колесами и рельсами, обсуждаются преимущества использования подхода П. Дирака вместо моделей, не учитывающих проскальзывания колес относительно рельсов.

Вторая глава посвящена исследованию механизмов изменения структуры прослойки между контактирующими с трением телами, которая оказывает непосредственное влияние на изменение потенциальной энергии тел при наличии разрушения их приповерхностных слоев, обсуждаемое в первой главе диссертации. Также решаемая во второй главе задача об изменении структуры расположения элементов прослойки вдоль области контакта тел может рассматриваться как отдельная задача

механики деформируемого твердого тела, важная для формирования технологий обработки материалов. В работе изучаются закономерности движения двух соседних элементов прослойки шаровидной формы (они моделируются одинаковыми твердыми шариками), обусловленные напряженно-деформированным состоянием в окрестности этих элементов. Шарики расположены между твердой подвижной плитой и упругой неподвижной подстилающей поверхностью, моделирующими тела, взаимодействие шариков с плитой происходит посредством микропроскальзывания, взаимодействие с подстилающей поверхностью – посредством микропроскальзывания или скольжения. Помимо сил трения, действующих в касательном направлении к взаимодействующим поверхностям шариков, плиты и подстилающей поверхности, в работе учитывается сила притяжения шариков друг к другу, возникающая из-за перекоса областей их контакта с подстилающей поверхностью во внешнюю сторону шариков, обратно пропорциональная квадрату расстояния между их центрами. Для каждого случая движения строится соответствующая система сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений с иерархической структурой малых параметров при производных, которая далее рассматривается при помощи методов, развитых в работах А.Н. Тихонова и А.Б. Васильевой. Показано, что для рассматриваемых в диссертации условий движения шарики сближаются, выведены аналитические формулы, описывающие это сближение. Корректность построенных в диссертации асимптотических моделей и формул подтверждается большим объемом численных исследований и соответствием полученных результатов данным экспериментов, проведенных в работах Р.В. Гольдштейна и Н.М. Осипенко.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научные результаты, вынесенные соискателем на защиту, являются **новыми** и представляют несомненный интерес для развития методов математического моделирования динамики систем с микропроскальзыванием и хрупким разрушением приповерхностных слоев взаимодействующих тел. Результаты диссертации обсуждались на международных конференциях и в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Обоснованность результатов диссертации гарантируется корректностью постановки задачи и строгостью используемых математических методов. **Достоверность** результатов подтверждается соответствием выводов диссертации известным результатам классических и новых работ в исследуемой области, численными исследованиями и представленными в литературе результатами экспериментов. **Практическая значимость** диссертации заключается в возможности применения ее результатов в машиностроении, задачах динамики колесо-рельс, а также при исследовании характеристик износа

взаимодействующих поверхностей в зависимости от структуры промежуточной прослойки, регулируя которую, можно целенаправленно повышать долговечность узлов трения.

Автореферат диссертации корректно и полно отражает ее содержание.

К работе имеются следующие замечания.

1. Список литературы можно было бы существенно дополнить работами российских и зарубежных авторов, в которых рассматриваются модели контактного взаимодействия тел. В частности, стоило бы дать ссылки на монографию и обзорные статьи И.Г. Горячевой, на монографию Е.А. Марченко, а также на недавние работы Е.В. Торской, Н.М. Осипенко и других авторов.

2. В тексте встречаются опечатки, а также стилистические и терминологические неточности. Так, например, на странице 18 диссертации речь идет о переносных и относительных скоростях контуров тел. Такая терминология, как минимум, требует уточнения, так как о скорости тела в теоретической механике обычно говорят лишь случае его поступательного движения. В общем случае кинематика твердого тела определяется линейной скоростью полюса и угловой скоростью тела.

3. В работе явно недостаточно графического материала, что создает затруднения при чтении и понимании отдельных параграфов диссертации. В частности, введенную в параграфе 1.2 систему координат стоило бы проиллюстрировать рисунком.

4. Для обоснования адекватности математических моделей, используемых в работе, стоило бы сделать больший акцент на их соответствии результатам экспериментов в предметной области исследования.

5. Математические модели контактного взаимодействия тел, используемые в диссертации, в значительной степени построены на базе подходов и методов, предложенных в работах Р.В. Гольдштейна. Следовало бы указать в чем новизна используемых в диссертации математических моделей и в какой степени диссертационное исследование дополняет, уточняет или развивает результаты упомянутых работ.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям

Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Соискатель Элина Игоревна Макиева заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:
Доктор физико-математических наук, доцент, профессор РАН
И.о. заведующего кафедрой № 921 "Прикладная математика"
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
Бардин Борис Сабирович

Подпись Бардина Бориса Сабировича заверяю
Заместитель начальника Отдела кадров МАИ _____ Иванов М.А.

Контактные данные:
тел.: +7 ; e-mail: bardinbs@mai.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.02.01 – Теоретическая механика

Адрес места работы:
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра 921 «Прикладная математика»
тел.: +7(499) 158-44-66; e-mail: bardinbs@mai.ru