

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Димаки Андрея Викторовича «Нелинейные закономерности контактного взаимодействия неметаллических материалов, обусловленные вязкостью и разрушением», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела

### Актуальность темы диссертации

Контактное взаимодействие неметаллических материалов имеет принципиально важное значение во многих областях машиностроения. Неметаллические материалы используются при изготовлении триботехнических изделий различного назначения, от тормозных колодок из композиционных материалов и покрышек колес автомобилей до изделий медицинского назначения, таких как протезы сердечных клапанов и т.д. Не менее важным является исследование указанных закономерностей, определяющих поведение природных сред, образованных, как правило, неметаллическими материалами и имеющих блочную структуру. К таким средам относятся геологические разломно-блоковые системы от регионального до планетарного масштабов, отклик которых на внешнее воздействие определяется физико-механическими свойствами межблочных границ раздела, в том числе, величиной эффективного коэффициента трения. Диссипативный характер сил трения при контактном взаимодействии физически обусловлен наличием каналов диссипации упругой энергии, запасенной в контактирующих телах, иными словами, способов ее перехода в другие формы. В неметаллических материалах, характеризующихся упругим и/или вязкоупругим характером отклика, основными каналами диссипации упругой энергии являются диссипация в результате работы вязких сил и затраты энергии на разрушение межмолекулярных связей. В свою очередь, в порнищаемых материалах, поровый объем которых заполнен жидкостью или газом, диссипация может происходить также в результате затрат энергии на перемещение вмещаемого флюида по системе сообщающихся пор и каналов. Отмеченные факторы характеризуют проблему изучения закономерностей отклика неметаллических материалов и сред при контактном взаимодействии как комплексную и требующую применения методов, позволяющих учитывать процессы, протекающие на различных пространственных и временных масштабах. В связи со сказанным выше, выявление и формализация закономерностей, устанавливающих связь между параметрами контактного взаимодействия, к которым относятся, в частности, коэффициент

ИФПМ СО РАН		
«05»	10	2017г.
вх. №	6	
ИНДЕКС		

коэффициент трения скольжения и сдвиговая прочность контактной пары (определяющая величину коэффициента трения покоя и условие перехода от схватывания к проскальзыванию), с параметрами нагружения, физико-механическими свойствами контактирующих материалов, рельефом поверхности контакта и т.д., представляет собой важнейшую фундаментальную и прикладную проблему. **Вышесказанное свидетельствует о несомненной актуальности темы данной диссертационной работы.**

## Содержание работы

Диссертация включает введение, три главы, заключение и список литературы из 266 наименований отечественных и зарубежных источников. Работа изложена на 214 страницах, содержит 65 рисунков и 2 таблицы.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложены вынесенные на защиту положения, описана структура диссертации.

**В первой главе** описан метод редукции размерности, использованный автором для теоретического изучения процессов трения и износа упругих и вязкоупругих материалов, в том числе эластомеров с линейной реологией. Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить величину коэффициента трения между вязкоупругим материалом и жестким шероховатым контртелом при различных значениях скорости относительного проскальзывания, нормальной прижимающей силы, вязкости материала и средней величины наклона профиля шероховатости в области контакта. Предложено аналитическое решение задачи трения уединенной жесткой шероховатости и вязкоупругого материала с учетом тепловыделения и зависимости вязкости от температуры. Развита модель износа произвольных тел вращения, приведены результаты верификации данной модели.

**Во второй главе** описан развитый подход к теоретическому описанию механического отклика и разрушения проницаемых материалов, насыщенных жидкостью или газом. Данный подход основан на совместном применении метода сеток и метода дискретных элементов в рамках единой численной модели. Это позволило учесть пористую структуру материала на различных пространственных масштабах. Приведены результаты верификации и валидации развитого подхода, продемонстрировано согласие результатов численного моделирования с существующими аналитическими

оценками распределений порового давления и данными, полученными в экспериментах.

**В третьей главе** описаны результаты применения развитой гибридной модели для изучения влияния процессов перераспределения флюида в поровом объеме образцов проницаемых материалов на их прочность в различных условиях нагружения. Показано, что прочность образцов упруго-хрупких материалов, насыщенных жидкостью, при их одноосном сжатии определяется конкуренцией процессов роста порового давления по мере сжатия образцов и снижением давления в результате истечения жидкости через боковые поверхности образцов. Получено аналитическое выражение для прочности таких образцов, имеющее вид логистической зависимости прочности от параметра, имеющего размерность давления. Предложен обобщенный функциональный вид трехчленной зависимости сдвиговой прочности упруго-пластической границы раздела в проницаемой флюидонасыщенной блочной среде. Отмечено, что предложенный вид зависимости обусловлен конкуренцией процессов дилатансии материала границы раздела, уменьшения объема пор в материале при сжатии и фильтрационного переноса флюида.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам выполнения диссертационного исследования.

**К основным результатам работы**, обладающим *научной новизной*, можно отнести следующие.

1. Предложена обобщенная зависимость коэффициента трения в паре «вязкоупругий материал – жесткое контртело» от параметров нагружения и свойств контактирующих поверхностей, с высокой точностью описывающая результаты численного моделирования тангенциального контакта эластомера с жесткой шероховатой поверхностью, имеющей фрактальный рельеф.
2. Осуществлено развитие метода подвижных клеточных автоматов для решения задач деформирования и разрушения флюидонасыщенных материалов.
3. Построена аналитическая зависимость прочности упруго-хрупких пористых образцов, насыщенных жидкостью, при их одноосном сжатии от физико-механических параметров каркаса и жидкости, скорости деформации и геометрии образца.
4. Для деформирования в условиях стесненного сдвига предложен общий функциональный вид нелинейной зависимости прочности проницаемой упругопластической границы раздела в среде, насыщенной жидкостью, от

параметров нагружения и физико-механических свойств твердой и жидкой фаз.

**Обоснованность и достоверность вынесенных на защиту положений и выводов, представленных в диссертации,** подтверждаются корректной постановкой цели и задач диссертационного исследования, комплексным подходом к решению сформулированных задач с использованием современных методов математического моделирования, таких как метод дискретных элементов, метод сеток и метод редукции размерности. Достоверность полученных результатов теоретического изучения закономерностей отклика неметаллических материалов при контактном взаимодействии подтверждается адекватной постановкой задач моделирования, обоснованным выбором начальных и граничных условий, соотнесением результатов моделирования с данными других авторов, их непротиворечивостью существующим научным представлениям, а также наличием 23 работ, опубликованных в журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК и включенных в библиографические базы данных Web of Science и Scopus.

**Научная значимость** полученных результатов заключается в том, что они имеют фундаментальный характер и вносят существенный вклад в развитие современных представлений о влиянии каналов диссипации упругой энергии, обусловленных вязкостью и разрушением, на контактное взаимодействие неметаллических материалов. Полученная обобщенная зависимость величины коэффициента трения при тангенциальном контакте вязкоупругого материала с жестким шероховатым контртелом может служить основой для построения новых моделей контактного взаимодействия вязкоупругих материалов, учитывающих вовлечение канала диссипации упругой энергии, обусловленного вязкостью, на различных пространственных и временных масштабах. Предложенная в работе интерпретация результатов численного моделирования сдвигового нагружения упруго-пластической границы раздела в флюидонасыщенной блочной среде позволяет расширить теоретические представления об особенностях деформирования и разрушения таких материалов и сред, как горные породы и пористые органические материалы.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит в том, что результаты проведенных исследований могут быть использованы для оценивания сил трения в контактах с широким спектром пространственных и

временных масштабов взаимодействия, прогнозирования динамики износа различных узлов машин и механизмов, при изучении прочностных свойств проницаемых материалов и сред, насыщенных жидкостью или газом, а также при анализе динамики приближения состояния участков разломно-блоковых сред к критическому.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В главе 1 используется условие «упругого подобия», предполагающее связь модулей сдвига и коэффициента Пуассона контактирующих материалов. Возникает вопрос, насколько это условие ограничивает круг рассматриваемых материалов.
2. Для практических задач была бы полезна возможность учета в методе редукции размерности трансверсальной анизотропии контактирующих материалов.
3. Во второй главе диссертации указано, что в развитой автором модели учитывается диффузия газа и коэффициент растворимости. При этом не указано влияние образования твердого раствора на границах «твердое тело – газ» на прочность образцов флюидонасыщенных материалов.
4. В качестве одного из модельных материалов, используемых при проведении расчетов, описанных в третьей главе, выбран песчаник. Известно, что, в зависимости от происхождения, глубины залегания и т.д., образцы песчаников могут демонстрировать существенно различные физико-механические свойства. В работе следовало бы указать, свойства какого именно песчаника использованы в качестве входных параметров модели.
5. Работу украсило бы более подробное сравнение с экспериментальными результатами.

**Высказанные замечания не снижают общую положительную оценку работы и не ставят под сомнение результаты, выносимые на защиту.**

### **Заключение**


Оппонент удовлетворен как результатами диссертационной работы, так и путями их достижения. Работа написана ясным научным языком на высоком профессиональном уровне. В работе практически отсутствуют опечатки. Автор продемонстрировал прекрасное владение как аналитическими, так и вычислительными методами. Представленный автореферат в достаточной

мере отражает содержание диссертации. Апробация работы проходила в докладах на конференциях международного уровня, результаты опубликованы в известных высокорейтинговых журналах.

Диссертационная работа А.В. Димаки представляет собой законченную работу, выполненную на высоком научно-квалификационном уровне. Результаты работы расширяют существующие представления о закономерностях влияния процессов диссипации упругой энергии на контактное взаимодействие неметаллических материалов. Совокупность полученных автором результатов можно квалифицировать как научное достижение, вносящее существенный вклад в механику деформированного твердого тела. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне полученных результатов данная диссертационная работа соответствует пункту 1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых» паспорта специальности 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела, физико-математические науки. **Диссертация «Нелинейные закономерности контактного взаимодействия неметаллических материалов, обусловленные вязкостью и разрушением» соответствует требованиям пункта II.9 «Положения о присуждении ученых степеней» а Димаки Андрей Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела.**

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией «Дискретные модели механики» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук

02.10.17   
(дата)

Кривцов Антон-Иржи Мирославович

Подпись  удостоверяю  
Заведующая сектором кадров

Адрес: 199178, Санкт-Петербург

Большой проспект В.О., д. 61

Тел. 8(911)121-40-35, E-mail: akrivtsov@bk.ru

«02» 10

20 17 г.

Э.В. Сталь

