

ОТЗЫВ

**официального оппонента ПЛЕХОВА ОЛЕГА АНАТОЛЬЕВИЧА
на диссертационную работу ДИМАКИ АНДРЕЯ ВИКТОРОВИЧА
«НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОНТАКТНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕМЕТАЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЯЗКОСТЬЮ И РАЗРУШЕНИЕМ»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.02.04 – Механика
деформируемого твёрдого тела**

Актуальность темы диссертационных исследований

Развитие методов компьютерного моделирования является одной из актуальных задач современного этапа развития науки, направленного на переход к цифровой экономике и виртуальному проектированию конструкций и технологических процессов. Разработка эффективных численных методов и математических моделей сложных многофакторных физических процессов позволяет существенно сократить время разработки новых конструкций, уменьшить количество требуемых натуральных экспериментов и, как следствие, снизить стоимость проектирования и повысить конкурентоспособность Российской экономики. В представленной работе рассмотрены две актуальные фундаментальные проблемы, имеющие высокий инновационный потенциал. В первой главе диссертации построена модель контактного взаимодействия вязко-упругого основания с жёстким шероховатым контртелом, позволяющая проводить оценку коэффициента трения с учётом фрактальности поверхности контакта, диссипации энергии, вязкости и разрушения. В последующих главах развит оригинальный эффективный подход к моделированию задач фильтрации флюида в пористой среде, позволяющий прогнозировать процессы деформирования и разрушения упруго-хрупких, упруго-пластичных сред. При решении обеих поставленных задач получены новые фундаментальные научные результаты, позволяющие глубже понять исследуемые процессы. Например, впервые высказана и убедительно обоснована гипотеза о «двухмасштабности» силы трения, определяющая зависимость коэффициента трения от наибольшего и наименьшего пространственных масштабов шероховатости.

ИФПМ СО РАН	
« ____ »	03 ОКТ 2017 201__г.
вх. №	5
индекс	_____

Ряд полученных результатов имеет большое практическое значение и может быть непосредственно использован при оптимизации технологических процессов. Например, оптимизации трения путём направленного выбора относительной скорости скольжения и подбора частоты осцилляций прижимающего нормального давления.

Полученные результаты являются перспективными и будут интересны для широкого круга специалистов, работающих в области механики, трибологии, горной механики, вычислительной механики и физики прочности. В связи с вышеизложенным, **актуальность** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Содержание работы

Представленная к оппонированию диссертационная работа А.В. Димаки состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка использованных источников, включающего 266 работ.

Во введении описана структура и объём диссертации, отмечена актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, степень их проработанности, перечислены положения, выносимые на защиту, подчёркнута их новизна, достоверность, степень апробации, раскрыта теоретическая и практическая значимость, степень опубликованности результатов в периодической научной печати и личный вклад соискателя в проделанную работу.

Первая глава диссертации посвящена решению задачи о контактном взаимодействии вязко-упругого основания с жёстким шероховатым контртелом на основе метода редукции размерности. В начале главы изложены теоретические основы метода редукции размерности и особенности численной реализации одномерной модели, далее представлены результаты расчёта коэффициента трения с учётом самоподобия поверхности одного из тел контакта, осцилляций прижимающего усилия, процессов диссипации энергии (фрикционного разогрева) и износа поверхностей трения.

Во второй главе развит новый подход к теоретическому описанию механического отклика и разрушения пористых проницаемых материалов и сред, насыщенных жидкостью и газом. В данной главе сформулированы

основные гипотезы и уравнения для реализации метода гибридных клеточных автоматов, проведена верификация метода на основе решения задачи о расчёте стационарных режимов фильтрации газа в плоскопараллельном пористом пласте. Дополнительно эффективность и достоверность реализованного метода продемонстрирована путём решения задач о сорбции газа угольным слоем, просачивании жидкости через тонкий слой и выдавливания жидкости из образца при одноосном нагружении.

В третьей главе предложенный метод моделирования поведения флюидонасыщенных пористых сред применён для анализа прочности упруго-хрупких и упруго-пластических сред при различных условиях нагружения. В данной главе исследовано влияние порового давления газа и жидкости на прочность материала, исследована сдвиговая прочность упруго-пластических флюидонасыщенных интерфейсов.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам выполнения диссертационного исследования, среди которых необходимо отметить:

развита модель контакта «эластомер – жесткое шероховатое контр-тело», основанная на методе редукции размерности и позволяющая получать значения коэффициента трения с явным учётом нелинейного отклика эластомера и пространственно-временной многомасштабности контактного взаимодействия;

предложено обобщенное выражение для коэффициента трения в пятне контакта вязко-упругого материала с уединённой шероховатостью конической формы в стационарном режиме скольжения с явным учётом тепловыделения и зависимости вязкости от температуры, показана необходимость обобщения процедуры построения «единой кривой» путём введения скейлинга по двум осям координат;

развит гибридный подход, основанный на совмещении метода дискретных элементов и метода сеток и учитывающий пространственные масштабы пористости от нано до макро;

продемонстрировано определяющее влияние вязкости заполняющего флюида на прочность флюидонасыщенного упруго-хрупкого материала;

построено обобщенное выражение для сдвиговой прочности флюидонасыщенной упруго-вязкой границы раздела в проницаемой блочной среде, связывающее значение сдвиговой прочности со скоростью деформации, характерными линейными параметрами системы и физико-механическими свойствами твёрдого каркаса и заполняющей жидкости.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Диссертантом сформулированы четыре пункта научной новизны.

Пункт 1. Впервые получена обобщённая нелинейная зависимость коэффициента трения в паре «эластомер – жесткое шероховатое контртело» от параметров нагружения, свойств материала и параметров шероховатости поверхности контртела, имеющей фрактальный рельеф.

Метод учета фрактальности поверхности является действительно новым, результаты, в частности, вывод о «двухмасштабности» процесса трения, получены впервые.

Пункт 2. Впервые получено обобщённое нелинейное уравнение для коэффициента трения между жестким коническим индентором, моделирующим уединённую шероховатость, и вязко-упругим основанием с явным учётом тепловыделения в контакте.

По данному пункту необходимо отметить, что, несмотря на наличие ряда допущений при выводе уравнения для коэффициента трения, оно адекватно описывает влияние фрикционного разогрева и позволяет проанализировать степень влияния различных параметров процесса на величину коэффициента трения.

Пункт 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. Показано, что прочность таких образцов определяется конкуренцией процессов роста порового давления жидкости при сжатии образцов и снижения порового давления за счёт оттока жидкости из образца в окружающее пространство.

Данный пункт является, безусловно, важным в связи с тем, что результаты численного моделирования обобщены и предложена автомоделная зависимость прочности водонасыщенных образцов, справедливая для различных скоростей нагружения и упругих свойств пористого каркаса.

Пункт 4. Предложен общий функциональный вид нелинейной зависимости прочности проницаемой упруго-пластической среды, насыщенной жидкостью, от параметров нагружения в условиях стеснённого сдвига. Продемонстрировано значительное влияние давления жидкости в поровом пространстве на сдвиговую прочность упруго-пластической проницаемой среды.

Данные результаты являются важными при анализе прочностных свойств разломов литосферных плит и могут быть использованы для более глубокого анализа процессов генерации землетрясений и повышения эффективности их прогноза.

Соответственно вышеприведенным пунктам научной новизны А.В. Димаки сформулированы семь положений, выносимых на защиту. Формулировка, суть и новизна выдвигаемых положений не вызывают возражений.

Анализ **обоснованности и достоверности** полученных результатов позволяет утверждать, что результаты диссертации получены с использованием актуальных физико-механических моделей, математических методов и алгоритмов. Моделирование рассматриваемых процессов выполнено с соблюдением всех принципов вычислительной математики и с использованием верифицированных программных кодов. Полученные результаты достоверны и не противоречат общефизическим принципам и ранее опубликованным данным.

Результаты диссертации **обсуждались** на всероссийских и международных конференциях, полнота их опубликования соответствует требованиям ВАК.

Научная и практическая ценность результатов.

А.В. Димаки получены новые научные результаты, которые вносят вклад в развитие методов вычислительной механики, понимание основополагающих процессов в трибологии и механике флюидонасыщенных пористых сред.

Практическая значимость работы состоит в создании компьютерных моделей и получении простых зависимостей для ряда ключевых параметров рассматриваемых процессов (коэффициента трения, сдвиговой прочности), которые могут быть использованы для анализа и оптимизации широкого класса технологических и природных процессов.

Список замечаний по диссертации и автореферату.

1. В работе проведён анализ влияния шероховатости контртела на величину коэффициента трения. При этом самоподобие поверхности описывается в терминах спектральной плотности с использованием показателя Хёрста как меры фрактальности поверхности. Почему выбран именно этот параметр для описания свойств геометрических объектов? Чем он удобнее, например, размерности Хаусдорфа-Безиковича и возможно ли его использование в случае обобщения модели для описания мультифрактальных поверхностей? Аналогичный вопрос возникает в целом для применимости метода редукции размерности при анализе трения с самоаффинными поверхностями.
2. Одним из ключевых параметров модели является функция отклика дискретного элемента – «единая» кривая упрочнения (стр. 115). Из текста диссертации не понятно, каким образом данная функция может быть экспериментально определена для рассматриваемых малых объёмов материала и какие зависимости закладывались в модель при проведении дальнейших расчётов.
3. При верификации метода рассмотрена задача стационарной фильтрации газа в плоскопараллельном пористом слое (стр. 131), расчёты проводились при соотношении размеров подвижного клеточного автомата и пространственного шага сетки 8 к 1. В тексте диссертации не проанализировано, к чему ведёт изменение этого параметра, является ли это соотношение оптимальным и сохраняется ли оно для остальных расчётов, представленных в диссертации.
4. В процессе моделирования одноосного сжатия пористых образцов упруго-хрупкого модельного флюидонасыщенного материала задача решается в двумерной постановке в приближении плоско-напряжённого состояния

(стр. 149). Почему выбрано приближение плоско-напряжённого состояния, на первый взгляд кажущееся неестественным для моделирования эксперимента на сжатие?

5. В работе присутствует незначительное число опечаток. В частности, интенсивности напряжений на страницах 112 и 114 имеют различное положение верхних и нижних индексов. На странице 32 допущена опечатка в формуле (1.15), что существенно затрудняет анализ последующих соотношений и модели учёта временной многомасштабности.

Замечания, высказанные по работе, не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Структура диссертации является логичной. Стиль изложения материала диссертации – ясный, количество ошибок стилистического и орфографического характера незначительно. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне 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 твёрдого тела.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат диссертации полностью соответствует основному тексту диссертации и опубликованным работам. Уровень апробации результатов работы (публикации в международных научных журналах и выступления на конференциях) – соответствует самым высоким требованиям. Результаты работы опубликованы в профильных периодических научных журналах с высокими импакт-факторами.

Заключение о соответствии работы п. II 9. Положения о присуждении учёных степеней

Принимая во внимание всё вышеизложенное, считаю, что диссертация Андрея Викторовича Димаки является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение ряда актуальных научных задач и

разработка положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, вносящее существенный вклад в развитие механики деформируемого твёрдого тела, а именно в развитие существующих представлений об особенностях трибологических процессов и процессов деформирования и разрушения пористых флюидонасыщенных сред.

В целом представленная диссертационная работа полностью соответствует требованиям п. II.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями Постановления от 21 апреля 2016 г., №335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а А.В. Димаки заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела),
профессор РАН,
зам. директора по научной работе
"Института механики сплошных сред
Уральского отделения Российской
академии наук" - филиала Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Пермского
федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской
академии наук

Адрес: «ИМСС УрО РАН», 614013,
г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1.

e-mail: roa@icmm.ru
Тел. +7 (3422) 37-83-21.

Подпись О.А. Плехова заверяю:

Учёный секретарь «ИМСС УрО РАН»



Юрлова Наталья Алексеевна

Плехов Олег Анатольевич



Дата

М.П.