

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Пантелеева Ивана Алексеевича "Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность темы исследований.

Освоение подземного пространства, извлечение минеральных ресурсов, воздействие на недра в ходе разработки месторождений полезных ископаемых – все это требует развития научных представлений о свойствах горных пород и их поведении при инженерном воздействии. Накопление эмпирических знаний должно сопровождаться развитием и усложнением геомеханических моделей, позволяющих адекватно описывать механику горных пород. Отличием естественных материалов от создаваемых человеком является неизвестность их истории формирования и, как следствие, ограниченность информации о структурах разного масштаба, проявляющихся при деформировании пород. Тема исследований Пантелеева И.А. является крайне актуальной и соответствует современным направлениям развития механики деформируемого твердого тела.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Защищаемые научные положения, выводы и рекомендации обоснованы путем сочетания анализа натурных данных с помощью строгих методов математического моделирования с проведением многочисленных лабораторных экспериментов, разработкой и верификацией моделей изучаемых процессов, основанных на физических представлениях о процессах разрушения геоматериалов. Автор продемонстрировал прекрасное владение современными методами анализа сложных процессов, знакомство со всеми базовыми представлениями, положенными в основу современных моделей деформационных процессов. Знакомство с современным состоянием вопроса не ограничено перечислением работ других авторов, достижения других специалистов активно используются в работе автора.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Проведенные исследования являются достаточно уникальными. Под руководством автора и при его непосредственном участии выполнены несколько серий оригинальных лабораторных экспериментов по изучению связи акустической эмиссии (являющейся аналогом сейсмических событий в натурном масштабе) с напряженным состоянием.

Полученные результаты позволили автору выдвинуть обоснованные гипотезы о природе закономерностей и выявить физические факторы, определяющие динамику рас-

смаатриваемых режимов. Гипотезы, сформулированные для объяснения натуральных закономерностей, проверялись в лабораторных экспериментах.

Достоверность основных выводов работы основана на тщательном анализе качества и однородности исходных данных, на проверке отсутствия артефактов, на применении обоснованных статистических методов анализа данных. Экспериментально показано, что в основе феномена медленных деформационных волн, проявляющихся на планетарном масштабе в форме пространственной эволюции сейсмических событий, лежат процессы локализации деформации, наблюдающиеся на лабораторных масштабах. Автору удалось экспериментально определить условия проявления эффекта Кайзера при изменении ориентации, формы и размера эллипсоида приложенных напряжений, что позволяет существенно расширить возможности применения метода для анализа анизотропного напряженного состояния образцов горных пород до их извлечения. И.А. Пантелеев разработал оригинальный трехступенчатый алгоритм уточнения решений для тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. Применение этого метода для анализа лабораторных испытаний образцов гранита позволило автору выделить акустические импульсы с разным механизмом. Автор предложил новую нелинейную реологическую модель деформирования хрупкого тела, на основе которой удалось адекватно описать направленный характер проявления эффекта Кайзера при циклическом трехосном непропорциональном сжатии образцов горных пород. Автор убедительно продемонстрировал, что при одноосном сжатии с боковым подпором хрупкого материала оптимальным углом наклона зоны локализованной поврежденности является угол, близкий к углу Кулона-Мора.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов. Научная значимость работы определяется развитием новых моделей деформируемого твердого тела, направленных на учет анизотропии упругих свойств, определяемой поврежденностью материала. Полученные автором оригинальные экспериментальные результаты по деформации образцов горных пород при циклическом непропорциональном трехосном сжатии будут востребованы при развитии методик определения исходного напряженного состояния пород на основе использования направленного эффекта Кайзера.

Наблюдение в лабораторном эксперименте динамики развития локализации деформации имеет важное значение для определения физических механизмов «медленных» деформационных волн, слабое место в теории существования которых связано именно с отсутствием общепринятого физического объяснения.

Практическая значимость полученных автором результатов связана с существенным расширением возможностей геомеханического моделирования поведения анизотропных горных пород при неравнокомпонентном нагружении. Предложенные и развитые ав-

тором модели, безусловно, будут востребованы для решения целого ряда практических геомеханических задач, возникающих при разработке месторождений полезных ископаемых, как твердых, так и месторождений нефти и газа, при разработке технологий геотермальной энергетики, при захоронении различного вида опасных отходов и углекислого газа.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, объем диссертации 365 страниц, она включает 144 рисунка и 5 таблиц. Список цитируемых научных публикаций содержит 564 наименования.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель работы, решаемые задачи, приводятся основные оригинальные результаты, защищаемые положения, даются сведения о вкладе автора в работу, об апробации и об основных публикациях автора по теме диссертации.

В основном тексте автор отказался от наиболее часто используемой схемы представления результатов, в которой первая глава является обзорно-постановочной, а в последующих рассматриваются отдельные задачи, решенные в диссертационной работе, в диссертации И.А. Пантелеева каждая глава содержит и обзор современного состояния проблемы, и описание применяемых методов и полученных результатов. **Первая глава** представляет одно из направлений, развиваемых автором - исследование локализации деформации в горных породах с использованием метода корреляции цифровых изображений породы в ходе проведения испытаний. После достаточно детального изложения существующих работ в этом направлении и подробного описания используемой методики автор приводит результаты двух групп экспериментов: по квазистатическому одноосному прямому растяжению образцов сильвинита и по физическому моделированию с помощью водной пасты монтмориллонитовой глины процессов формирования и развития сдвиговых зон континентальной литосферы. В экспериментах второй группы автору удалось выделить формирование и распространение «медленных» деформационных волн, скорости которых на два порядка выше скорости деформирования.

Во второй главе приведены результаты исследования механизмов разрушения гранита при трехточечном изгибе на основе анализа тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. Глава начинается с подробного обзора методов анализа импульсов акустической эмиссии, возникающих при деформировании и разрушении материалов в лабораторных экспериментах. Излагается теория определения компонент смещения в источнике акустического импульса через компоненты тензора сейсмического момента. Разработанные теоретические представления применяются к анализу данных по регистрации акустических импульсов в лабораторном эксперименте. Предложен трехстадийный алгоритм выбора устойчивых решений для механизмов акустических событий. Анализ

полученных устойчивых решений показал преобладание трещин сдвига и отрыва при трехточечном изгибе образцов гранита, а также соответствие механизмов акустических событий конфигурации нагрузок.

Третья глава посвящена рассмотрению результатов исследования эффекта Кайзера при циклическом непропорциональном сжатии песчаника. Как и в предыдущих главах, вначале идет обзор публикаций по экспериментальным результатам и теоретическим представлениям о проявлении эффекта Кайзера при различных условиях нагружения горных пород. Далее представлены методика проведения экспериментов по нагружению образцов песчаника и результаты регистрации акустической эмиссии, возникающей при циклическом всестороннем и трехосном сжатии по разным программам нагружения. Особенно интересными представляются результаты экспериментов по циклическому трехосному сжатию с изменением формы, размеров и ориентации эллипсоида напряжений Ламе. Показано отсутствие “памяти” материала при смене только направления главного напряжения и наличие “памяти” при повторном деформировании материала в заданном направлении. Также продемонстрировано, что на проявление эффекта Кайзера не влияет уровень интенсивности касательных напряжений в образце.

Экспериментальные результаты, описанные в третьей главе, используются в **четвертой главе** для формулировки нелинейной реологической модели деформирования хрупкого тела с тензорной поврежденностью. Глава начинается с литературного обзора существующих теоретических представлений о деформировании структурно-неоднородных хрупких материалов, на основе обзора делается вывод о необходимости развития обобщенных моделей. Автор вводит тензор поврежденности второго ранга, главные значения которого определяют сокращение площади поперечного сечения материала в трех ортогональных направлениях, что позволяет описать анизотропию упругих свойств, вызванную поврежденностью. Получены кинетические уравнения для компонент тензора поврежденности и тензора необратимой деформации, и показано, что в процессе неравнокомпонентного деформирования исходный изотропный материал становится ортотропным, упругие свойства которого зависят от вида напряженного состояния и уровня поврежденности в ортогональных направлениях. Выведены условия локальной выпуклости потенциала, обеспечивающие единственность решения статической задачи теории упругости. Предложенная модель верифицирована по данным истинного трехосного сжатия песчаника и использована для решения двух задач о формировании микротрещиноватости в хрупком теле при его одноосном сжатии с боковым подпором: 1) об изменении ориентировки вторичной трещиноватости, 2) определение оптимальной ориентации зоны локализованной поврежденности.

В пятой главе модель деформирования хрупкого материала с тензорным параметром поврежденности обобщается на пористые тела. После обзора работ в этом направлении вводится понятие тензора уплотнения, предлагается кинетическое уравнение для компонент тензора уплотнения, описывающее экспоненциальную релаксацию деформации уплотнения до равновесного значения, проводится идентификация и верификация модели тензорного уплотнения на основе экспериментальных данных. Важным достижением автора является введение тензора уплотнения как независимого термодинамического параметра наряду с упругой деформацией, тензором поврежденности и степенью насыщенности флюидом. Получены определяющие соотношения для нелинейной пороупругой модели, учитывающей два тензорных механизма деформирования хрупкого пористого материала: микротрещинообразование и уплотнение пористого пространства. Использование предложенной модели позволило автору описать проявление эффекта Кайзера при нагружении хрупкого пористого материала.

Заключение является обобщением всей объемной работы, описанной автором в предыдущих главах и включающей как теоретические, так и экспериментальные исследования. В заключении автор формулирует основные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

Замечания.

1. Стр.37 – уравнение 1.2 не является волновым, его решение не описывает распространение волны с некоторой скоростью, распространение возмущения имеет характер диффузии.
2. Стр.70 «...датчик крепился на поверхности» - неясно, датчик прижимался к поверхности или приклеивался?
3. Стр.71 «... с активностью (скоростью счета) акустической эмиссии» - что такое «скорость счета», видимо, это количество импульсов в единицу времени?
4. Стр.75 «... деформирование локализовано в периодических пространственных структурах, являющихся собственной формой кинетического уравнения для деформации» - нечеткая формулировка, непонятно, как пространственные структуры могут быть формой кинетического уравнения?
5. Стр.80 и 82, формулы 1.46, 1.48 – нет расшифровки обозначений параметров уравнения, что такое η (вязкость?), K ?
6. Стр.200 – неудачный (и непонятный) термин «хрупкое деформирование».
7. Стр.203 – деформацию 10^{-3} вряд ли можно считать малой.
8. Стр.212, формула 4.17 – выше говорится о разности тензоров, в формуле сумма, нужно пояснение.

9. Стр.241, подпись к рис.4.17, «пунктирные линии» - на графике не видно пунктирных линий.
10. Недостаточно четко прослеживается связь между отдельными направлениями проведенных исследований.

Высказанные выше замечания не снижают высокой значимости работы и носят терминологический характер либо могут быть использованы автором в его дальнейшей работе.

Заключение. В диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики деформируемого твердого тела применительно к проблемам геомеханики. Результаты работы опубликованы в ведущих журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, представлены на крупных российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержимое диссертации.

Диссертационная работа И.А. Пантелеева " Деформирование горных пород и геосфер: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации" удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с П.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Пантелеев Иван Алексеевич безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, доктор физико-математических наук

Турунтаев Сергей Борисович

Адрес: 119334, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1

E-mail: s.turuntaev@gmail.com

Тел.: +7(499)1376611

Подпись С.Б.Турунтаева удостоверяю
ученый секретарь ИДГ РАН, к.ф.-м.н.

Д.Н. Локтев

