

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИФЗ РАН,



Доктор физико-математических наук

С.А. Тихоцкий

«11» сентября 2023 года

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук на диссертационную работу Еремина Михаила Олеговича на тему «Математическое моделирование процессов деформации и разрушения природных и искусственных материалов и сред», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела.

#### Актуальность

В диссертационной работе М.О. Еремина представлен ряд нелинейных задач о механическом поведении горных пород и эволюции НДС, учитывающих накопление неупругих деформаций и повреждений, и соответствующую деградацию свойств при различных видах нагружения. Эти задачи актуальны для геомеханики, поскольку до сих пор не существует единой модели, способной достоверно предсказывать механическое поведение микронеоднородных сред в области необратимого деформирования.

#### Общая характеристика работы

Работа состоит из введения, пяти основных разделов, заключения, списка использованных литературных источников и приложения. Во введении автор

ИФПМ СО РАН	
18 СЕН 2023 201_г.	
вх. №	180923/1
индекс	

диссертационного исследования обосновывает актуальность и значимость решаемых задач, ставит цели исследования, обосновывает достоверность полученных результатов. В качестве основной цели исследования заявлена разработка математической модели процессов деформации и разрушения природных и искусственных материалов и сред, их эволюции к критическому состоянию, с учетом структурных особенностей, законов накопления повреждений и деградации физико-механических свойств.

В первом основном разделе автор приводит обзор книг и статей, посвященных математическим и физическим исследованиям неупругого деформирования микронеоднородных сред. Рассматриваются различные модели накопления повреждений в ходе увеличения необратимых деформаций, исследуется понятие критических напряжений, принимаемое в фундаментальной науке и при проведении прикладных исследований, изучается соответствие между этими понятиями. Отдельное внимание уделено подземной отработке месторождений полезных ископаемых и принятым на практике методам оценки устойчивости.

Во втором разделе автор описывает общую систему уравнений механики сплошных сред с учетом накопления необратимых деформаций, которая впоследствии решается методами математического моделирования. Автор использует критерий Друкера-Прагера и неассоциированный закон пластического течения для достоверного описания пластического деформирования пород. Используемая модель допускает возможность учета деградации предела прочности на сдвиг с накоплением повреждений по степенному закону. Накопление повреждений рассматривается как развивающаяся потеря сплошности. Автор определяет количество неизвестных параметров модели и число независимых экспериментов, необходимых для определения этих параметров.

В третьем разделе представлены результаты численного моделирования процессов деформирования образцов горных пород и искусственных

материалов в лабораторных условиях. Рассматриваются стандартные эксперименты по одноосному сжатию образцов песчаников Кузнецкого бассейна и искусственных материалов, а также испытания образцов оксида алюминия на трехточечный изгиб и расклинивание. Автор демонстрирует соответствия результатов экспериментальных исследований результатам численного моделирования, что подтверждает достоверность предложенной математической модели. Результаты моделирования позволили автору сделать ряд важных выводов об определении критического состояния горной породы, обосновать связь между прочностью породы и критическими напряжениями.

В четвертом разделе автор диссертационного исследования использует сформулированную математическую модель для описания напряженно-деформированного состояния при разработке угольного месторождения Кузнецкого бассейна. Подробно описывается создание геометрической модели пластов и объектов инфраструктуры, постановка граничных условий, определений механических свойств различных участков модели. По результатам численного моделирования определены тенденции в накоплении и локализации необратимых деформаций, продемонстрировано, что использование эмпирических подходов к оценке устойчивости целиков и формирования критического состояния породы не позволяет достоверно прогнозировать обрушения. В то же время, проведение численного моделирования дает возможность прогнозировать катастрофические процессы с высокой степенью достоверности.

В пятом разделе автор проводит аналогичное численное исследование сейсмичности геологической среды на примере Чуйско-Курайской разломной зоны. Построена трехмерная модель участка массива горных пород, учитывающая рельеф дневной поверхности, модель заполнена механическими свойствами, поставлены граничные условия, позволяющие учитывать скольжение массива по разлому. Проведен анализ сейсмичности: скорость изменения неупругой энергии в элементах численной модели связывается с

энергетическими характеристиками потенциальных землетрясений, продемонстрировано, что моделируемые землетрясения подчиняются основным статистическим законам сейсмологии.

В заключительном разделе автор повторяет краткий обзор полученных результатов и формулирует основные выводы по работе. В приложении представлена численная схема, использованная автором диссертационного исследования для проведения математического моделирования.

### **Новизна**

Научная новизна в значительной степени определяется расширением возможностей модели Друкера-Прагера с неассоциированным законом пластического течения благодаря ее дополнению законами разупрочнения по мере накопления дефектов в микронеоднородной среде. Существенной новизной также обладает разработанная методика определения критических точек на кривой нагружения, соответствующих началу накопления необратимых деформаций, началу неустойчивого роста трещин и потере породой сплошности. Полученные результаты в значительной степени подтверждаются результатами лабораторных исследований, что подтверждает их достоверность. Автор также относит к пунктам научной новизны исследования ряд методик, применимых для прогноза аварийных ситуаций при разработке подземных месторождений твердых полезных ископаемых, однако, как указано ниже, эти результаты получены для конкретных объектов и вопрос об их универсальности остается открытым.

### **Значимость**

В то же время, упомянутые методики - методика определения шагов обрушения массива природных материалов над выработанным пространством, методика оценки устойчивости охранных целиков – обладают ощутимой практической значимостью. Привлечение разработанных автором методов оценки этих аспектов разработки подземных месторождений полезных

ископаемых, по всей вероятности, позволит снизить геологические и экологические риски, что внесет дополнительный вклад в развитие отрасли.

### **Достоверность**

Достоверность результатов, полученных в ходе математического моделирования, определяется их соответствием результатам лабораторных экспериментов (раздел 2), косвенным методам изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород (разделы 3 и 4), а также статистическим законам сейсмологии (раздел 5). Автор также демонстрирует исследования сходимости численного решения ряда задач, что также свидетельствует о достоверности результатов, полученных развиваемыми методами.

### **По тексту диссертации имеются следующие замечания:**

В разделе 2 представлена общая система уравнений механики сплошной среды, дополненная моделью эволюции поверхности текучести и используемая при моделировании одноосного сжатия. Сразу за этим разделом, в разделе 3.1.1 представлено исследование сходимости численного решения поставленной задачи, однако отсутствует описание метода решения. Более того, между разделами 2 и 3.1.1 отсутствует описание геометрии задачи, в частности, математическое описание пор и условий на границе между порами и твердой фазой.

В третьем разделе выполнено подробное исследование порогового напряжения начала неустойчивого трещинообразования  $\sigma_{cd}$ , при достижении которого процесс разрушения становится самоподдерживающимся. Предложены способы определения порогового напряжения. Однако при этом нигде не упоминается известное аналитическое исследование бифуркации процесса неупругого деформирования, выполненное (Rudnicki and Rice, 1975) на основе теории неассоциированного пластического течения в форме Прандтля-Рейсса для материала с внутренним трением и дилатансией. Поскольку найденное Рудницким и Райсом выражение для критического

значения модуля пластического упрочнения  $H_{cr}$ , позволяет определить обсуждаемое в диссертации пороговое напряжение  $\sigma_{cd}$ , отсутствие соответствующего сравнения обедняет работу.

В разделе 3.1.4 указано, что «Распределение пор в расчетной области проводилось с помощью генератора псевдослучайных чисел по экспериментальному логнормальному закону». Использование такого подхода допускает возможность наложения пор друг на друга, переопределения условий на границе пора – твердая фаза, неустойчивости решения в зонах, расположенных между близкими друг к другу порами, нарушения геометрии задачи. Также существует риск того, что пора оказывается рядом с границей расчетной области, что приводит к аналогичным проблемам. Такая ситуация особенно вероятна при высоких значениях пористости, использованных в исследовании (до 23% согласно рис. 12) Автор не указывает, каким образом обходил эти затруднения.

В завершении раздела 3.1.5 представлен крайне важный результат – показанная на рис. 14 зависимость прочности на сжатие от пористости. Видно, что результаты численного моделирования не способны достоверно описывать прочность при малых пористостях (до 0.05). Автор отмечает это обстоятельство, но не комментирует его. С другой стороны, можно было бы ожидать, что именно малая концентрация пор должна была бы быть наиболее предпочтительным для моделирования случаем. Какие факторы, не учтенные в модели, могут вызывать это несоответствие экспериментальных и численных результатов? Можно было бы предположить, что в малопористых образцах присутствуют микроскопические дефекты, не учтенные в численной модели, однако в этом случае рассчитанная прочность была бы выше, а не ниже, чем определенная экспериментально.

Описанная в разделе 3.2.3 методика моделирования акустической эмиссии вызывает вопросы. Указано, что «Моделирование АЭ связано с подсчетом количества элементов, в которых выполнен критерий разрушения».

Насколько корректно ставить соответствие между количеством элементов и событиями акустической эмиссии? Будет ли развитие одной трещины вдоль нескольких элементов моделироваться несколькими событиями, хотя результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о том, что в этом случае будет одно событие с большей энергией? Не следовало бы перейти не к количеству событий, а к энергетическому описанию эмиссии?

Результаты, приведенные в разделе 4 демонстрируют возможности сформулированной автором математической модели по исследованию состояния одного конкретного объекта. Вызывает интерес, насколько эти результаты могут быть обобщены на другие массивы с подземной выработкой. Так, среди 4 выводов, представленных на стр. 127, первый выглядит достаточно очевидным и может быть сделан без проведения численного моделирования, а остальные выводы выглядят достаточно частными. Остается открытым вопрос, насколько сформулированная методика оценки устойчивости массивов с выработкой универсальна. При этом частные результаты повторены и в заключительном разделе диссертации.

В разделе 5.3.1 описано создание математической модели Чуйско-Курайской разломной зоны. Отдельный интерес вызывает заполнение модели свойствами, отраженное в таблице 10. Судя по тексту, предшествующему этой модели, часть параметров, способных оказать значительное влияние на результаты расчетов (коэффициент трения, дилатансии, критическая деформация) определяется по геофизическим данным с существенной неоднозначностью, однако автор детерменистически определяет одно значение для блока модели, не анализируя то, насколько результаты моделирования чувствительны к этим параметрам. Отдельно хочется отметить, что определение критической деформации оказывается ключевым в анализе, представленном в разделе 5.3.4.

В разделе 5.3.4 предлагается установление связи между приращениями тензора неупругих деформаций, тензора напряжений и магнитудой

сейсмических событий. Эта связь требует дополнительных пояснений: не рассмотрена процедура усреднения компонент тензоров напряжений и деформаций, опущен анализ представительного объема, на котором приращение неупругой механической энергии можно связать с магнитудой землетрясений. Нет ли риска того, что модель предполагает наличие области землетрясений с близкими магнитудами в некоторой области, тогда как на практике энергетически оправданным будет одно событие большей магнитуды?

Следует отметить, что в основном тексте диссертации отсутствует явное описание методики проведения расчетов и верификации использованного автором матобеспечения (основные элементы которого представлены в Приложении). Вследствие этого возникают вопросы о корректности некоторых результатов. В частности:

1. На рисунке 25 приведена карта напряжений в образце с порами, из которой видно, что у границ пор напряжения превышают (в зонах, заполненных синим цветом) предел прочности материала на разрыв, который принят в модели равным 2.5 МПа. Никаких комментариев в тексте не найдено, хотя в Заключение в п.3 указывается, что «при пористости до 11% преобладает образование протяженных трещин отрыва», о чем свидетельствует и столбчатое разрушение некоторых образцов, как показано на рисунке 17.
2. На рисунке 33 приведены расчетные данные по поворотам оси максимального главного напряжения в балке при трехточечном изгибе на упругой стадии, которые плохо согласуются с траекториями главных напряжений, известными из фотоупругости (см, например, классические монографии Фрохта, 1941 или Кокера и Файлона, 1936).
3. Рисунок 31 демонстрирует странные результаты для эпюры напряжений в балке около опор.

Прочие незначительные замечания:

Следует прокомментировать выход значения мгновенного коэффициента Пуассона за пределы промежутка  $[0; 0.5]$ ;



Наблюдаются незначительные противоречия между отдельными частями диссертации: если в большинстве разделов предполагается положительный знак сжимающих напряжений, принятый в геомеханике, в отдельных случаях (например, рис. 31) в качестве положительных напряжений принимаются растягивающие напряжения;

В работе также присутствует несколько опечаток, например: «Кривая напряжение-деформация, полученное» (стр. 70), «Определение ... сталкивается необходимостью» (стр. 83), «интенсивность напряжение» (стр. 113), «Друккера-Прагера» (стр. 121, в остальном тексте фамилия Drucker транслитерируется как Друкер); «анализ общей морфотектонической картины системы новейших разломов Горного Алтая выявила» (стр. 131); «вызванное индо-евразийского коллизией» (стр. 133); «становится несущественно маленьким» (стр. 147); «по результату моделирования» (стр. 161).

#### **Заключение.**

Диссертация М.О. Еремина является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований разработаны теоретические положения. Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике. По актуальности, новизне, теоретической и практической значимости, обоснованности выводов и положений, выносимых на защиту, диссертационная работа «Математическое моделирование процессов деформации и разрушения природных и искусственных материалов и сред» полностью соответствует требованиям п. п. II. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, а ее автор, Еремин Михаил Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела.

Авторы отзыва согласны на обработку персональных данных.

Отзыв составили:

Зав. лабораторией геомеханики ИФЗ РАН №104,

д. ф. – м. н., профессор

И.А. Гарагаш

Главный научный сотрудник лаборатории геомеханики ИФЗ РАН №104,

д. ф. – м. н., профессор

А.Н. Галыбин

Ведущий научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга ИФЗ РАН №202

к. ф. – м. н.

Н.В. Дубиня

Диссертационная работа и отзыв обсуждены 05.09.2023 на семинаре лаборатории геомеханики №104 ИФЗ РАН (Протокол №1), на котором была обсуждена представленная диссертация. Отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1

Телефон: +7 (499) 766-26-56; e-mail: [direction@ifz.ru](mailto:direction@ifz.ru)

Подписи И.А. Гарагаша, А.Н. Галыбина и Н.В. Дубини заверяю.

Учёный секретарь ИФЗ РАН

к.ф.-м.н.



Д.В. Лиходеев