

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ПФИЦ УрО РАН,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



О.А. Плехов

2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Пермского федерального исследовательского центра

Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН)

на диссертацию Дмитриева Сергея Владимировича

на тему: «Развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

В ПФИЦ УрО РАН представлена диссертация Дмитриева С.В. на тему «Развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей», изложенная на 149 страницах машинописного текста, состоящая из введения, четырех глав, выводов по главам, заключения, включающего основные результаты, а также списка использованной литературы, насчитывающего 110 наименований, и автореферат диссертации. По результатам обсуждения материалов диссертации на заседании ученого совета Горного института Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН») – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН) принято следующее заключение.

1. Актуальность представленной диссертационной работы

Диссертация Дмитриева Сергея Владимировича направлена на решение актуальной научно-практической задачи по разработке методики учета структурных нарушений при

объёмном моделировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом конечных элементов.

Тектонические напряжения и разломные структуры различного масштаба могут оказывать существенное воздействие на распределение НДС, в том числе в окрестности элементов горной технологии, и делают необходимым проведение прогнозного трехмерного численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. Взаимодействие двух этих факторов делает необходимым представление структурных нарушений в объемной постановке.

Отнесение месторождений КФ АО "Апатит" и АО "СЗФК" к числу склонных и опасных по горным ударам делает проведение прогнозного моделирования обязательной процедурой при планировании горных работ. Для прогноза удароопасных зон, на этих месторождениях утверждена и согласована методика, основанная на расчетах в программном комплексе SigmaGT, представление разломов, даек и окисленных зон в котором возможно представлением их материалом с усредненными упругими характеристиками. Развитие методики и программного комплекса возможностью учета влияния контактных характеристик структурных неоднородностей позволит повысить уровень создаваемых прогнозных моделей нарушенного массива горных пород.

2. Общая характеристика содержания диссертации

Диссертационная работа Дмитриева С.В. посвящена разработке методики эффективной оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей. Основной идеей работы является определение диапазона эффективного использования объемных контактных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов скальных горных пород со структурными нарушениями. Поставленная в работе цель разработки методики учета структурных нарушений при объёмном моделировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом конечных элементов достигнута на основе многовариантного численного моделирования участков массива горных пород, включающего структурные нарушения.

В первой главе автором представлен обзор современного состояния вопроса, касающегося учета структурных неоднородностей при моделировании НДС массива, показана их классификация, описывается объект исследования, дана характеристика современного программного обеспечения для численного моделирования НДС массива. Показана используемая методика последовательных приближений при моделировании НДС на рудниках месторождений Хибинского массива. Представлен алгоритм метода

конечных элементов (МКЭ), который был реализован для дальнейших исследований. Приведены результаты тестирования алгоритма на абстрактных моделях и обоснование применяемого основного метода исследований.

Во второй главе описан подход к моделированию структурных неоднородностей с использованием контактного элемента, предложенного Р. Гудманом. Представлена трехмерная модификация контактного элемента Гудмана с выведением его матрицы жесткости контакта. Выполнена оценка поведения контактного элемента под нагрузкой на абстрактных моделях при различных значениях нормальной и тангенциальной жесткости, что позволило выявить влияние этих параметров на механическое поведение трещины. Были смоделированы различные сценарии изменения нормальной жесткости и тангенциальной жесткости для оценки степени влияния этих параметров на устойчивость контакта и характер распределения напряжений вблизи трещины. Произведен анализ расчетных значений главных напряжений на моделях с интеграцией контактных элементов по поверхности разломной структуры с заполнителем. В выводах по данной главе выделены ограничения использования контактных элементов Гудмана для моделирования неоднородностей, главным из которых является создание неструктурированной сетки конечных элементов, что усложняет дальнейшие манипуляции с ней.

Третья глава содержит описание процесса и результаты определения параметров жесткости закрытой трещины лабораторным испытанием на сдвиг. Описан процесс проведения оценочных экспериментов, который заключался в создании ряда моделей с вариацией значений касательной и нормальной жесткости при включении структурной неоднородности в кровле выработки. Представлено соотнесение результатов измерений с полученными эмпирическим путем параметрами нормальной и тангенциальной жесткости. Предложен подход к моделированию разгрузочной строчки с использованием контактных элементов, что позволило оценить эффект разгрузочных мероприятий на НДС массива в окрестности выработки под действием гравитационно-тектонических напряжений. В рамках данной главы, также выполнена оценка эффективности использования контактных элементов по поверхности контакта структурной неоднородности с заполнителем. Автором выделены классы моделей, в которых внедрение контактных элементов, по поверхности контакта разлома, даёт ощутимый эффект. Определены варианты моделей, при которых достаточно представления разлома эквивалентным замещающим материалом.

В четвертой главе представлен вариант представления структурных нарушений в используемом на месторождениях Хибинского массива программном комплексе.

Детально изложен алгоритм разработанного автором подхода к сохранению регулярной сетки конечных элементов при внедрении в неё слоя контакт-элементов. Описана методика оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей, основной идеей которой является определение типа структурного нарушения и выбор оптимального алгоритма процесса моделирования. Выполнена апробация разработанной методики на участке выработки с трещиной на контуре. Представлены результаты численного моделирования НДС выбранного участка и сопоставление их с геодинамической характеристикой массива.

Автор диссертационной работы успешно выполнил комплекс задач, связанных с заявленной тематикой, что подтверждает завершенность представленной к защите диссертационной работы.

3. Основные научные результаты диссертации

Диссертантом на защиту выносятся три научных положения.

В первом положении, на основании результатов лабораторных испытаний образцов группы щелочных габбоидов на сдвиг, определены значения нормальной $\bar{k}_n = 4.1 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$ и тангенциальной $\bar{k}_s = 1.0 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$ жесткости закрытой трещины вмещающих пород месторождений Хибинского массива. Рассчитанный коэффициент жесткости $\frac{k_n}{k_s}$ равняется 4.55 и попадает в ранее установленный диапазон для аналогичного типа и масштаба нарушений. Полученное в результате численного моделирования распределение напряжений указывает на существенное влияние закрытой трещины с определенными параметрами жесткости контактного элемента.

Во втором положении установлено, что наиболее эффективным является учет контактных характеристик при моделировании НДС в окрестности структурной неоднородности с заполнителем, деформационные свойства которой отличаются от вмещающего массива не более чем на порядок или в окрестности закрытой трещины без заполнителя. В противном случае достаточно представления разлома эквивалентным замещающим материалом и использование контактных элементов на границах разнородных сред не является обязательным условием корректности геомеханических расчетов, так как изменения значений напряжений не превышают 10 %, что сопоставимо с точностью численного моделирования.

В третьем научном положении представлена разработанная автором методика моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом

структурных неоднородностей и сохранением регулярной сетки конечных элементов, позволяющая оценить влияние разломных структур с различным масштабом и типом заполнителя на вероятность сдвига по их контакту и распределение напряжений.

4. Научная новизна работы заключается в подходе к учету влияния структурных неоднородностей с различным масштабом и типом заполнителя на перераспределение параметров поля напряжений участка массива горных пород; оценке влияния соотношения упругих характеристик заполнителя и вмещающего массива на распределение напряжений в окрестности моделируемой разломной структуры; определении усредненных параметров нормальной и тангенциальной жесткости для закрытых трещин в образцах пород месторождений Хибинского массива; разработке специальных элементов позволяющих сохранить регулярную конечно-элементную сетку при моделировании напряженно-деформированного состояния массива со структурными нарушениями.

5. Практическая ценность результатов диссертационной работы

Несомненным плюсом диссертационной работы, представляющим практическую значимость, является внедрение контактного элемента в программный комплекс SigmaGT, который на сегодняшний день является важным инструментом обеспечения безопасности ведения горных работ и используется на ряде крупных горнодобывающих предприятий Кольского полуострова и не только.

Применение разработанной автором методики моделирования НДС массива с учетом структурных неоднородностей позволит более детально оценивать поле напряжений и повысит точность геомеханических прогнозов.

Результаты исследований реализованы на горных предприятиях Мурманской области в рамках выполнения договорных работ с КФ АО «Апатит», АО «СЗФК», АО «КГМК» и представлены в отчетах по темам НИР №0226_2019_0058 и FMEZ-2022-0004

6. Полнота опубликования результатов диссертации

Основные результаты, положения и рекомендации диссертации были апробированы и получили одобрение специалистов в области горного дела на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах. Результаты исследования опубликованы в 11 работах, из которых 5 статей были опубликованы в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. Диссертантом получено 2 свидетельства о

регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Роспатент на разработанные в рамках выполнения диссертационной работы программные продукты, получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № RU 2023681528 и № RU 2023680657.

7. Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований; разработке алгоритмов и программных модулей, позволяющих использовать объемные контактные элементы в структурированной сетке конечных элементов; проведении лабораторных испытаний образцов на сдвиг и анализе полученных результатов для получения параметров жесткости закрытой трещины; выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния массива пород методом конечных элементов; анализе и обобщении результатов численного моделирования; разработке методики моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом структурных неоднородностей, позволяющей оценить влияние разломных структур с различным масштабом и типом заполнителя на вероятность сдвига по их контакту и распределение напряжений.

8. О стиле и языке диссертации и автореферата. Соответствие автореферата основным положениям диссертации.

Содержание и тема диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.8.6 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация и автореферат изложены технически грамотным языком, оформлены в соответствии с требованиями ВАК и ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автор использовал общепринятую научную горную терминологию, что делает полученный результат доступным широкому кругу специалистов. Вывод и рекомендации работы изложены четко и лаконично. Графические материалы оформлены с применением современных компьютерных программ. Математический аппарат описываемых в диссертации методов представлен в полной мере и может быть использован другими исследователями.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации по всем квалификационным признакам: целям, задачам, научной новизне, практической значимости и положениям, выносимым на защиту.

9. Вопросы и замечания по диссертации и автореферату

По содержанию диссертации сформулированы следующие замечания:

1. При обработке экспериментальных данных не делалась поправка на собственную жесткость сдвигового оборудования, что дает несколько заниженные значения нормальной и сдвиговой жесткости трещины.

2. Разработанная методика оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород не отражает запредельное разрушения по контактными неоднородностям.

3. Не понятно существенное отличие жесткостей контактов, принятых в модельных расчетах, от значений, полученных в экспериментах (стр. 57,86). Не улучшает восприятия различие в размерностях жесткостей контактов по тексту диссертации.

4. Несмотря на то, что соискатель упоминает работы Калякина В.Н., он, по-видимому, не знаком с его статьей в соавторстве с Janchao Li «Numerical simulation of interfaces in geomaterials: development of new-zero-thickness interface element», в которой демонстрируется что элемент Гудман вносит ошибку в значения тангенциальных напряжений на докритической стадии, а именно эта ситуация рассматривается в диссертации.

5. Достаточно было построить деформированную сетку (например, рис. 2.4), чтобы понять, что значения нормальной жесткости контакта при численном моделировании должны значительно превышать модуль Юнга. В противном случае может происходить взаимопроникновение стенок контакта, что и подтверждает таблица 2.2.

6. В диссертации отсутствует сравнение результатов моделирования, с фактическим данными.

10. Заключение

В целом указанные замечания не снижают значимости работы. Представленная на отзыв диссертационная работа Дмитриева Сергея Владимировича на тему «Развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей» выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических исследований, лабораторных измерений и результатов численного моделирования определен диапазон эффективного использования объемных контактных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния массивов скальных горных пород со структурными нарушениями.

Представленная к защите диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует требованиям, предъявляемым в п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, а её автор, Дмитриев Сергей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Отзыв ведущей организации рассмотрен и утвержден на заседании ученого совета Горного института Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН») – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН) 28 января 2025 г. (Протокол № 1).

Старший научный сотрудник
лаборатории физических процессов
освоения георесурсов ГИ УрО РАН, к.т.н.
E-mail: ivpan@mi-perm.ru, тел. (342) 216-37-03

Паньков Иван Леонидович

Старший научный сотрудник
лаборатории механики горных
пород ГИ УрО РАН, к.т.н.
E-mail: rm_anton@mi-perm.ru, тел. (342) 225-00-50

Федосеев Антон Кимович

Согласны на обработку персональных данных.

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук. Адрес: 614000, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а. Тел.: +7 (342) 212-60-08; e-mail: psc@permsc.ru, официальный сайт <http://www.permsc.ru>

Подписи старшего научного сотрудника лаборатории физических процессов освоения георесурсов «ГИ УрО РАН» кандидата технических наук Панькова Ивана Леонидовича и старшего научного сотрудника лаборатории механики горных пород «ГИ УрО РАН» кандидата технических наук Федосеева Антона Кимовича удостоверяю.

Главный специалист по кадрам
«ГИ УрО РАН»



С.Г. Дерюженко

30 января 2025