

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук Криницына Романа Владимировича на диссертацию Дмитриева Сергея Владимировича «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»

Актуальность работы, цели и задачи исследования

Геомеханическая безопасность является и продолжает оставаться одной из ключевых и актуальных задач при разработке месторождений. Автором подчеркивается, что при выемке полезных ископаемых возникает ряд технологических проблем, связанных с процессами, происходящими на границах структурных неоднородностей. На рудниках КФ АО «Апатит» и АО «СЗФК» численное моделирование напряженно-деформированного состояния проводится в программном продукте SigmaGT, одним из авторов которого является сам диссертант. Уточнение контактных характеристик неоднородностей и расширение функционала оригинального программного обеспечения должны повысить адекватность создаваемых прогнозных моделей нарушенного массива горных пород. В связи с этим, развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом структурных неоднородностей и их характеристик является актуальной научной задачей.

Основная идея диссертации состоит в выделении классов моделей, в которых использование объемных контактных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния массивов скальных горных пород со структурными нарушениями наиболее эффективно. Поставленные автором задачи исследования соответствуют идее и цели диссертации.

Оценка содержания работы и доказательства научных положений.

Диссертация Дмитриева С.В. представлена введением, четырьмя главами и заключением. Весь материал изложен на 149 страницах машинописного текста, включающих 7 приложений, 17 таблиц и 48 формул. Текст проиллюстрирован 73 рисунками. Список литературы включает 110 наименований. Во введении обозначены цель и задачи исследования. Цель и задачи соответствуют тематике исследований, указанной в названии работы. Первая глава содержит аналитический обзор по теме диссертации. В следующих трех главах раскрываются и доказываются научные положения. Выводы по главам согласуются с поставленными задачами и тематикой исследования. В заключении представлены результаты, также в полной мере отвечающие поставленным задачам.

Первая глава. В первой главе представлен обзор современного состояния вопроса, касающегося учета структурных неоднородностей при исследовании НДС массива, показана их классификация. Описан объект исследования, а также методы численного моделирования и их применение в существующих программных решениях. Детально изложен алгоритм метода конечных элементов, реализованный для дальнейших исследований, результаты его тестирования на абстрактных моделях и обоснование его использования, как основного метода, который автором используется в работе.

Вторая глава. Вторая глава носит поисковый характер, в ней дана оценка поведения контакта трещины при различных значениях нормальной и тангенциальной жесткости. Представлены результаты ряда численных экспериментов в плоской постановке, что позволило выявить закономерности изменения относительных узловых перемещений контактного элемента. Были смоделированы различные сценарии изменения нормальной и тангенциальной жесткости и оценено их влияние на устойчивость контакта и распределение напряжений вблизи трещины. Описана модификация элемента Гудмана, включая вывод матрицы жесткости контакта для трехмерного моделирования. Выведена матрица жесткости трехмерного контактного элемента, что позволяет проводить более точные расчеты и повысить достоверность результатов численного моделирования в объемной постановке. Автором выявлены ограничения применения объемных контактных элементов для моделирования неоднородностей, основным из которых является необходимость создания неструктурированной сетки конечных элементов, что усложняет дальнейшую работу с ней, особенно в случае прогнозного моделирования геомеханической ситуации на горном предприятии.

Третья глава. Данная глава посвящена доказательству двух научных положений и, соответственно, разделена на две части. В первой части главы представлено первое научное положение - значения нормальной и тангенциальной жесткости закрытой трещины для образцов вмещающих пород месторождений Хибинского массива составляют $\bar{k}_n = 4.1 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$ и $\bar{k}_s = 1.0 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$. Коэффициент жесткости попадает в ранее установленный диапазон для аналогичного типа и масштаба нарушений. Модельное распределение напряжений указывает на существенное влияние закрытой трещины с определенными параметрами жесткости контакта. Автором описан процесс проведения лабораторных испытаний на сдвиг образцов керна, отобранных на месторождениях Хибинского массива, и приведены результаты определения параметров жесткости закрытой трещины. Представлен анализ полученных результатов, который показал частичное разрушение неровностей поверхностей трещин в образцах при повторном их нагружении. Результаты лабораторных измерений сопоставлены с характеристиками, полученными эмпирическим путем в ходе многовариантного численного моделирования.

Вторая часть третьей главы посвящена доказательству второго научного положения - наиболее эффективным является учет контактных характеристик при моделировании НДС в окрестности структурной неоднородности, деформационные свойства которой отличаются от вмещающего массива не более чем на порядок или в окрестности закрытой трещины без заполнителя. В противном случае 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. Автором проведена оценка эффективности использования контактных элементов по плоскости структурной неоднородности с заполнителем. На основании ряда численных экспериментов, определены варианты моделей, при которых достаточно заполнения разлома эквивалентным замещающим материалом без использования контактных элементов.

Четвертая глава. Глава посвящена третьему научному положению - методике моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом структурных неоднородностей и сохранением регулярной сетки конечных элементов, позволяющей оценить влияние разломных структур с различным масштабом и типом заполнителя на вероятность сдвига по их контакту и распределение напряжений. Предложенная автором методика основывается на описанных ранее выводах и

результатах, также она включает в себя подход к сохранению структурированности конечно-элементной сетки, позволяет избежать трудоемкой интеграции слоев контактных элементах в случаях, где их использование менее эффективно. Продемонстрировано применение методики на частном случае – участке месторождения Олений ручей с выработкой, контур которой пересечен закрытой трещиной. По результатам проведенного численного моделирования напряженно-деформированного состояния данного участка, с использованием контактных элементов, автором были выявлены изменения действующего гравитационно-тектонического поля напряжений вблизи структурной неоднородности, а именно: более низкие значения сжимающих напряжений в стенках выработки, и зоны выраженных растягивающих напряжений по минимальной компоненте. На основании численного моделирования, автор делает вывод, что при наличии трещины несколько ниже вероятность разрушения кровли выработки в динамической форме, что согласуется с геодинамической характеристикой массива, установленной по результатам визуального обследования.

Обоснованность и достоверность приведенных в диссертационной работе научных положений и выводов основана на достаточном изложении математического аппарата данного исследования, данных лабораторных испытаний и их корреляцией с результатами других исследователей, результатах многовариантного численного моделирования, подтвержденных геодинамической характеристикой участка массива одного из удароопасных месторождений Хибин.

Оценка научной новизны и практической значимости. К научным достижениям автора относятся: подход к сохранению регулярной сетки конечных элементов, при моделировании напряженно-деформированного состояния массива со структурными нарушениями за счет разработанных фиктивных контактных элементов; определение параметров жесткости для закрытых трещин в образцах пород Хибинского массива; установление влияния соотношения упругих характеристик заполнителя и вмещающего массива на распределение напряжений вблизи моделируемой разломной структуры; разработанный подход к учету воздействия структурных неоднородностей с различными масштабами и типами заполнителей на перераспределение параметров поля напряжений для участка массива горных пород. К практическим результатам, достигнутым автором, можно отнести: развитие подхода Р. Гудмана для трехмерного случая и разработка алгоритма автоматизированного построения регулярной сетки конечных элементов для объектов горной технологии вблизи структурных нарушений горного массива; создание инструмента для оценки вероятности сдвига на основе значений касательных напряжений и пространственной ориентации площадок сдвига.

Достоверность результатов исследований подтверждена сопоставлением данных лабораторных испытаний нарушенных образцов пород на сдвиг с результатами, полученными другими исследователями, сравнительной оценкой расчетных данных моделей с использованием разработанного фиктивного элемента и классической сетки конечных элементов; граничными условиями локальных моделей, соответствующими исследуемым участкам месторождений и основанными на результатах измерения напряжений *in situ*; сходимостью результатов геодинамической характеристики массива, полученных в ходе визуального обследования выработок, с данными моделирования.

Апробация работы. Ключевые результаты исследования были представлены на научных конференциях разного уровня в период с 2015 по 2024 год с соответствующими публикациями.

Замечания по диссертации

По диссертации имеются следующие замечания:

Нарушена привычная структура диссертационных работ: по первым двум главам отсутствуют научные положения, тогда как по третьей главе сформулировано два положения.

Избыточно представлено описание методов численного моделирования.

Апробация результатов численного моделирования основана лишь на сопоставлении с результатами визуального осмотра.

Заключение

Несмотря на сделанные замечания, считаю, что диссертационная работа Дмитриева Сергея Владимировича «Развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей», выполнена на актуальную тему, обладает новизной, является завершенной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией геодинамики и горного давления, ведущий научный сотрудник института горного дела Уральского отделения Российской академии наук.



Креницын Р.В.

«10» января 2025

Местонахождение: Россия, Свердловская область, Екатеринбург, улица Мамина-Сибиряка, 58 Институт горного дела Уральского отделения РАН (ИГД УрО РАН)
e-mail Roman_krinicyn@mail.ru

Подпись Креницына Романа Владимировича заверяю
начальник отдела кадров ИГД УрО РАН



С.В. Коптелова