

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ФИЦ КНЦ РАН

Академик РАН

С.В. Кривовичев

« 26 » февраля 2024 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН) на диссертацию Дмитриева Сергея Владимировича по теме «Развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей», представляемую на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 - Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Диссертация «Развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей» выполнена в Горном институте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Дмитриев Сергей Владимирович в 2014 году с отличием окончил магистратуру Кольского филиала Петрозаводского государственного университета по специальности 230.201 «Информационные системы и технологии». С 2014 по 2018 гг. прошел послевузовское профессиональное образование – аспирантуру Горного института ФИЦ КНЦ РАН по специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» и защитил на отлично выпускную квалификационную работу по теме «Применение численных методов для моделирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородностей». В 2024 г. подготовил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 - Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Научный руководитель - кандидат технических наук Семенова Инна Эриковна, руководитель отдела Геомеханики Горного института КНЦ РАН.

Актуальность диссертационной работы. При ведении горных работ как открытым, так и подземным способом, негативным фактором является тенденция усложнения горнотехнических и горно-геологических условий. Интенсивность горных работ, воздействие тектонических напряжений, а также наличие разного рода и масштаба разломных структур требуют их учета при геомеханическом обосновании и проектировании горных работ. Ряд технологических проблем связан с процессами, происходящими на контактах и при взаимодействии различных материалов на границах сред. Сдвиг по структурным неоднородностям в нарушенном массиве представляет собой

смещения блоков массива горных пород друг относительно друга, что может приводить к потере устойчивости элементов горной технологии. В рамках конечно-элементного (КЭ) анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом геологических структур возможно применение специальных контактных элементов, позволяющих задавать прочностные параметры интерфейса между блоками. Однако к настоящему времени не решены все вопросы внедрения контакт-элементов в объемные КЭ модели. В Горном институте КНЦ РАН разработана методика регионального прогноза удароопасных зон, на основе результатов расчетов НДС в ПК Sigma GT, которая является официально утвержденной и согласованной федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору на рудниках КФ АО "Апатит" и АО "СЗФК". Программный комплекс Sigma GT используется в службах прогноза и предупреждения горных ударов для оценки и прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород как при годовом и перспективном планировании горных работ, так и при сложных ситуациях с отклонением от планов горных работ. Поэтому расширение функционала данной методики, совершенствование конечно-элементных моделей и максимальное их приближение к фактическим условиям ведения горных работ с учетом структурных неоднородностей и сдвиговой составляющей (нормальной и тангенциальной жесткости) на контактах сред является, безусловно, актуальной задачей.

Цель работы заключается в разработке метода учета структурных нарушений при объемном моделировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом конечных элементов.

Идея работы состоит в определении диапазона эффективного использования объемных контактных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния массивов скальных горных пород со структурными нарушениями.

Объектом исследования является массив горных пород с включением структурных нарушений.

Предмет исследования – контактные характеристики и их влияние на НДС нарушенного массива горных пород.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследований, проведении лабораторных испытаний образцов на сдвиг и анализе полученных результатов для получения параметров жесткости закрытой трещины; проведении расчетов напряженно-деформированного состояния массива пород методом конечных элементов, разработке программных модулей, оценке и обобщении результатов численного моделирования.

Методологическая основа исследования. Общей теоретической и методологической основой исследования является комплексный подход, включающий анализ и обобщение научного и практического опыта по проблеме; использование математического аппарата механики твердого деформированного тела; разработка алгоритма и программного обеспечения для моделирования НДС массива горных пород; лабораторные испытания образцов пород на сдвиг; двумерное и трехмерное численное моделирование геомеханических процессов методом конечных элементов; верификация разработанной методики на основе данных о фактическом состоянии массива горных пород.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждаются: использованием классических гипотез и положений геомеханики и теории упругости; сравнительной оценкой расчетных данных моделей при внедрении

разработанного фиктивного элемента и при классической сетке конечных элементов; использованием высокоточных граничных условий локальных моделей, соответствующих исследуемым участкам месторождений; сходимостью результатов геодинамической характеристики массива по данным визуального обследования выработки с полученными в результате моделирования фактами распределениями компонент главных напряжений в окрестности моделируемой структуры.

Научная новизна работы состоит в использовании разработанных фиктивных контактных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния массива со структурными нарушениями, позволяющих сохранять регулярную конечно-элементную сетку; определенных параметров жесткости для закрытых трещин в образцах пород месторождений Хибинского массива; установленной степени влияния соотношения упругих характеристик заполнителя и вмещающего массива на распределение напряжений в окрестности моделируемой разломной структуры; подходе к учету влияния структурных неоднородностей с различным масштабом и типом заполнителя на перераспределение полей напряженно-деформированного состояния участка массива горных пород.

Практическая значимость работы заключается в развитии подхода Р. Гудмана для трёхмерного случая, что позволило вывести матрицу жёсткости трёхмерного контактного элемента и расширить возможности объемного численного моделирования контактов в задачах геомеханики; реализованном инструменте, позволяющем производить оценку вероятности сдвига по значениям касательных напряжений и пространственной ориентировке площадок сдвига; алгоритме автоматизированного построения регулярной сетки конечных элементов для объектов горной технологии вблизи структурных нарушений горного массива; определены усредненные значения нормальной и тангенциальной жесткости закрытой трещины для образцов вмещающих пород месторождений Хибинского массива; разработанном подходе к учету структурных неоднородностей при моделировании НДС массива, который используется для оценки состояния массива при планировании и ведении горных работ.

Ценность научной работы заключается в постановке и решении актуальной научно-практической задачи разработки методики моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом структурных неоднородностей, позволяющая оценить влияние разломных структур с различным масштабом и типом заполнителя на вероятность сдвига по их контакту и распределение напряжений.

Реализация результатов работы. Результаты исследований реализованы на горных предприятиях Мурманской области в рамках выполнения договорных работ с АО «Апатит», АО «СЗФК», АО «КГМК» и представлены в отчетах по темам НИР №0226_2019_0058 и FMEZ-2022-0004. Разработанные алгоритмы и программы зарегистрированы в федеральной службе по интеллектуальной собственности «Роспатент», получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № RU 2023681528 и № RU 2023680657

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. По результатам исследований Дмитриева С.В. опубликовано 11 работ, в том числе 5 статей - в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1 Дмитриев С.В., Семенова И.Э. Выявление особенностей распределения напряженно-деформированного состояния массива при вариации контактной жесткости разлома // Горная промышленность. – 2023. – № S1. – С. 110-115. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-S1-110-115.

2 Семенова И.Э., Дмитриев С.В., Шестов А.А. Численное моделирование неоднородностей в трехмерной постановке метода конечных элементов // Горный журнал. – 2020. – № 12. – С. 35-39. – DOI 10.17580/gzh.2020.12.07.

3 Дмитриев С.В. Выбор оптимальной модификации контактного элемента для моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом структурных неоднородностей // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2019. – № 1(63). – С. 143-153. – DOI 10.25702/KSC.2220-802X.1.2019.63.143-153.

4 Дмитриев С.В. Решение упругой задачи методом конечных элементов. Визуализация тензора напряжений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 7. – С. 222-227. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-7-0-222-227. – EDN YTCSRXD.

5 Аветисян И.М., Семенова И.Э., Дмитриев С.В., Шестов А.А. Анализ главных касательных напряжений и площадок сдвига в объемной модели упруго-деформируемого массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S23. – С. 258-264. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-10-23-258-264.

В прочих изданиях:

6 Дмитриев С.В., Семенова И.Э., Шестов А.А. The numerical modeling of heterogeneities by the finite element method in 3d setting // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : Proceedings of the EUROCK 2021 Conference on Rock Mechanics and Rock Engineering, Turin, Italy, 20–25 сентября 2021 года. Vol. 833. – Turin, Italy: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012094. – DOI 10.1088/1755-1315/833/1/012094.

7 Дмитриев С.В. Evaluation of a potential shear in the vicinity of structural violations by calculation results of stress-strain state of the rock massEvaluation of a potential shear in the vicinity of structural violations by calculation results of stress-strain state of the rock mass // EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : SET OF 2 VOLUMES, Saint Petersburg, 22–26 мая 2018 года. Vol. 1-2. – Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, London, UK, 2018. – P. 1593-1596.

8 Дмитриев С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородностей // Проблемы недропользования. – 2017. – № 1(12). – С. 132-137. – DOI 10.18454/2313-1586.2017.01.132.

9 Дмитриев С.В., Семенова И.Э, Шестов А.А. Обеспечение гетерогенности сетки при внедрении контактных элементов в трехмерные модели напряженно-деформированного состояния // Цифровые технологии в горном деле : Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, Апатиты, 16–18 июня 2021 года / Горный институт Кольский научный центр Российской академии наук; Кольский научный центр Российской академии наук. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2021. – С. 23.

10 Дмитриев С.В. Решение задачи трехмерной визуализации расчетов напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Геотехнология и обогащение

полезных ископаемых: Материалы VII Конференции-школы молодых ученых, Апатиты, 18–20 ноября 2015 года. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2016. – С. 5-10.

11 Дмитриев С.В. Применение численных методов для моделирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородности // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара, Москва, 05–09 октября 2015 года. Том 1. – Москва: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2015. – С. 85-90.

В опубликованных работах Дмитриева С.В., в полном объеме отражены основные результаты диссертационной работы, выводы и рекомендации. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Материалы диссертации, представленные Дмитриевым С.В. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэrogазодинамика и горная теплофизика», докладывались и широко обсуждались на общероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах: 4-ая молодежная тектонофизическая школа-семинар в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, 5 - 9 октября 2015 г.; VI школа молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых», Апатиты, 19 ноября 2015 г.; X Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (Институт горного дела УрО РАН, ГоИ КНЦ РАН), Апатиты, 28-30 марта 2016 г.; VIII Конференция-школа молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых» г. Апатиты, 16 ноября, 2016 г.; Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли», Апатиты, 10-12 октября 2017 г.; International european rock mechanics symposium, «EUROCK 2018», Санкт-Петербург, 22–26 мая 2018 г.; Молодежный форум «Молодая наука Арктики» и X Всероссийская конференция-школа молодых ученых и специалистов с международным участием в рамках VIII Международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее» - «МГПК БЕАР - 2018», Апатиты 14-15 ноября 2018 г.; Всероссийская конференция-школа молодых учёных и специалистов «Развитие технологий добычи и обогащения месторождений полезных ископаемых» в рамках IX международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее» (МГПК БЕАР 2019), Апатиты 12-13 ноября 2019 г.; Mechanics and rock engineering, from theory to practice, Turin, Italy 20–25 сентября 2021 г.; XV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (с участием иностранных ученых), Екатеринбург-Апатиты-Хабаровск 09-11 февраля 2021 г.; Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов »Цифровые технологии в горном деле», Апатиты 16-18 июня 2021 г.; Шестая Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах», Москва 21-24 июня 2022 г.; Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ», Апатиты 27-30 сентября 2022 г.; 16-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», Москва 23-27 октября 2023г.; XVIII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования», Апатиты, 06-09 февраля 2024 г.; были изложены в научно-

исследовательских отчетах Горного института КНЦ РАН и опубликованы в научных статьях.

Диссертационная работа соответствует пунктам паспорта специальности 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика: п.1 Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений; п.2 Геомеханическое обеспечение открытой и подземной добычи полезных ископаемых, разработка методов управления горным давлением, удароопасностью, креплением, сдвижением горных пород, устойчивостью бортов карьеров, разрезов, отвалов и подземных выработок; п.5 Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений; п.7 Создание на основе цифровых информационных технологий методов, приборов, автоматизированных систем для изучения и контроля свойств горных пород и грунтов, строения и состояния их массивов, а также для прогнозирования динамических процессов и явлений.

Выполненная диссертационная работа соответствует требованиям п. 14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842 «О порядке присуждения ученых степеней».

Диссертационная работа Дмитриева Сергея Владимировича по теме «Развитие методики оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом контактных характеристик структурных неоднородностей» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Заключение принято на заседании горной секции Учёного совета Горного института КНЦ РАН. Присутствовало на заседании 18 чел., в том числе – 4 доктора технических наук. Результаты голосования: «за» - 18 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол заседания горной секции Учёного совета Горного института КНЦ РАН от 26.02.2024 г.

Заключение подготовлено и выдано в соответствии с Положением об Ученом совете Горного института – обособленного подразделения ФИЦ «Кольский научный центр РАН», утвержденным Генеральным директором ФИЦ КНЦ РАН С.В. Кривовичевым 27 марта 2023 года (п.4.11).

Председатель заседания,
главный научный сотрудник
доктор технических наук

О.В. Наговицын

Секретарь заседания,
старший научный сотрудник
кандидат технических наук

И.М. Аветисян