

На правах рукописи

Вильнер Мария Александровна



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ НАГРУЗОК НА
КРЕПЬ СОПРЯЖЕНИЙ ВЫРАБОТОК В СТРУКТУРНО-
НАРУШЕННЫХ МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

Специальность 25.00.20 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Протосеня Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты:

Козырев Анатолий Александрович

доктор технических наук, Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», отдел геомеханики, начальник;

Трофимов Андрей Викторович

кандидат технических наук, ООО «Институт Гипроникель», лаборатория геотехники, заведующий лабораторией.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Защита диссертации состоится 21 июня 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.
Автореферат разослан 21 апреля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При разработке рудных месторождений проектируется обширная сеть горных выработок, объем сопряжений которых достигает 10 %. Строительство горных выработок влечет за собой изменение напряженно-деформированного состояния вмещающего массива. На сопряжениях горных выработок прогноз напряженно-деформированного состояния приконтурного массива осложняется их пространственной геометрией, взаимным влиянием пересекающихся выработок, а также последовательностью раскрытия сопряжения. Значительное влияние на закономерности перераспределения напряжений в приконтурном массиве оказывают механические характеристики горных пород, параметры структурной нарушенности и характер распределения начального поля напряжений. Согласно исследованиям, до 40 % от общего числа обрушений в горных выработках происходит при расщепке сопряжений или их перекреплении.

Определение нагрузок на крепь сопряжений в соответствии с существующей нормативной базой выполняется по методике, принятой для одиночных выработок, где геометрические параметры сопряжения учитываются через эквивалентную величину пролета.

Тенденция к интенсификации производственных процессов, увеличение глубин разработки и связанные с этим изменение напряженного состояния массива и ухудшение горно-геологических условий приводят к необходимости пересмотра и дополнения существующих подходов к оценке развития геомеханических процессов в приконтурном массиве на участках сопряжений горных выработок. Это предопределяет актуальность диссертационной работы, основной задачей которой является повышение достоверности прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений горных выработок.

Для более точного прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений необходимо учитывать геометрические параметры, параметры структурной нарушенности приконтурного массива и начальное поле напряженного состояния.

Степень разработанности темы исследования

Исследованием процесса деформирования и разрушения пород вокруг горных выработок, в том числе в структурно-нарушенных горных массивах, занимались многие ученые, среди которых следует упомянуть К.А. Ардашева, И.В. Баклашова, Н.С. Булычева, И.Е. Долгого, Б.А. Картозию, А.А. Козырева, Г.Н. Кузнецова, А.Г. Протосеню, К.В. Руппенейта, О.В. Тимофеева, В.Л. Трушко, Н.Н. Фотиеву, Г.Л. Фисенко, N.R. Barton, M. Cai, C. Edlbro, J. Engel, X.T. Feng, A. Khani, R. Shan и других.

Эмпирические закономерности, предложенные некоторыми из вышеназванных исследователей, позволяют произвести точную оценку для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий, но не решить задачу в общем виде. Аналитические подходы позволяют применить решение для любых горно-геологических условий, однако они сложны при наличии и необходимости учета большого количества структурных нарушений в массиве. Учесть параметры блочных массивов и физико-механические свойства пород в окрестности выработок позволяют методы численного моделирования. Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния приконтурного массива в рамках численного моделирования рассмотрены в работах Б.З. Амусина, А.П. Господарикова, О.К. Зенкевича, М.А. Карасева, А.Б. Фадеева, E. T. Brown, Y. H. Natzor, E. Hoek, R. McLeay, M. Jones и других.

В большинстве случаев решения получены в плоской постановке, что не очень хорошо соотносится с пространственным характером формирования напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений горных выработок.

Основные принципы обеспечения устойчивости сопряжений горных выработок, учитывающие их пространственную геометрию, разработаны в трудах М.С. Данилкина, Д.Н. Петрова, Ю.Н. Огородникова, П.С. Сыркина, А.П. Широкова, H. Gersek, F.Y. Hsiao, C.W. Yu и других.

Тем не менее, к настоящему времени не разработаны комплексные подходы, позволяющие одновременно учесть как геометрические, так и механические параметры, определяющие устойчивость приконтурного массива, а разработка таких подходов

является перспективной задачей.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899). Ее направленность отвечает стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (Распоряжение Правительства от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) в части технологий поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» по п.п. 1, 4, 5, 13.

Цель работы заключается в повышении достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок при их проектировании, строительстве и эксплуатации в структурно-нарушенных горных массивах при разработке апатит-нефелиновых месторождений.

Идея работы – повышение достоверности прогноза развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок и расчет нагрузок на крепь обеспечивается за счет решения задачи в пространственной постановке, а также задания контактных условий взаимодействия между структурными элементами массива; при этом определение параметров зоны возможного обрушения выполняется численными методами в рамках механики сплошной и дискретной сред для различных типов сопряжений горных выработок.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

1. Анализ типов структурной нарушенности горных пород и выделение основных видов нарушений на апатит-нефелиновых месторождениях на основании обработки данных геологического картирования.

2. Разработка методики численного моделирования и алгоритма построения численных моделей для прогноза развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных

выработок с различными геометрическими параметрами.

3. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности сопряжений горных выработок методами механики сплошной и дискретной сред.

4. Исследование влияния горно-геологических, геомеханических и горнотехнических факторов на устойчивость сопряжений горных выработок и формирование нагрузок на крепь.

5. Разработка методики оценки устойчивости горных выработок и прогноза нагрузок на крепь сопряжений в структурно-нарушенных массивах горных пород.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является выявление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния структурно-нарушенного массива горных пород для условий месторождений апатит-нефелиновых руд и повышение достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок, расположенных в таких условиях.

Научная новизна работы:

1. Предложен новый подход к оценке устойчивости сопряжений горных выработок, основанный на представлении породного массива в виде дискретной среды, где процесс деформирования и обрушения пород прогнозируется в рамках единой расчетной модели.

2. Выявлены закономерности распределения напряжений в окрестности сопряжений горных выработок и формирования нагрузок на крепь с учетом фактической геометрии сопряжения.

3. Получены новые закономерности, определяющие связь между напряженным состоянием массива горных пород, структурной нарушенностью и интенсивностью развития геомеханических процессов при строительстве сопряжений горных выработок.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм обоснования параметров численных моделей для прогноза геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок для условий апатит-нефелиновых месторождений.

2. Разработана методика прогноза нагрузок на крепь

сопряжений в структурно-нарушенных массивах горных пород.

3. Разработаны рекомендации по обеспечению устойчивости приконтурного массива сопряжений горных выработок.

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы для дополнения принятых на рудниках АО «Апатит» нормативных методик расчета параметров крепей.

5. Результаты диссертационной работы в соответствии с актом от 15.10.2021 г. внедрены в учебный процесс Горного университета при обучении студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации «Шахтное и подземное строительство» в рамках дисциплин «Механика сплошной среды», «Моделирование физических процессов в горном деле», «Строительство подземных сооружений».

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось с применением комплекса методов, включающего натурные исследования формирования нагрузок на крепь сопряжений, визуальное обследование состояния горных выработок, математическое описание механического поведения породного массива, численное моделирование геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Прогноз напряженно-деформированного состояния приконтурного массива горных выработок при блочном строении массива необходимо выполнять на основании представления массива дискретной средой и задания нелинейной прочности по контакту блоков.

2. Форма и размер зон возможного обрушения пород на участках сопряжений горных выработок, расположенных в структурно-нарушенных массивах горных пород, определяется пространственной геометрией сопряжения, отношением размера породного блока к фактическому пролету сопряжения и характером начального поля напряженного состояния.

3. Расчет параметров крепей сопряжений горных выработок должен основываться на результатах прогноза развития геомеханических процессов в массиве горных пород и учитывать его структурную нарушенность, напряженное состояние, тип и размер сопряжения, выраженные через интегральные показатели.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается сопоставлением полученных зависимостей с данными натурных наблюдений на участках сопряжений горных выработок и с результатами работ других исследователей, а также использованием современных методов численного моделирования в рамках механики дискретной среды.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2019 г.;

- Конференция молодых ученых «14. Freiberg-St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler», г. Фрайберг, Германия, 2019 г.;

- III Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса», Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2020 г.;

- XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2020 г.;

- X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2020 г.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования и нормативных методик; обосновании теоретических основ прогноза устойчивости массива на сопряжениях горных выработок; подборе параметров для численных моделей и проведении численных экспериментов, выполнении обработки и анализа результатов моделирования; получении новых закономерностей распределения напряжений в приконтурном блочном массиве сопряжений горных выработок; дополнении существующей методики определения размера зоны возможного обрушения на сопряжениях горных выработок.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы

в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 147 наименований. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков и 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы и нормативных методик по теме исследования, описаны и проанализированы существующие подходы к оценке нагрузок на крепь сопряжений горных выработок, расположенных в структурно-нарушенных массивах. Показано, что для расчета нагрузок на крепь сопряжений горных выработок используются методики, разработанные для одиночных выработок, с введением эмпирических коэффициентов.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены результаты проведенных натурных исследований горных выработок, расположенных в пределах Кировского рудника КФ АО «Апатит». Проанализированы формы потери устойчивости выработок по результатам натурных наблюдений. Разработана методика проведения пространственного численного моделирования прогнозного напряженно-деформированного состояния участков блочного горного массива, вмещающих сопряжения горных выработок.

В третьей главе выполнено обоснование параметров

численных моделей для исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива на участках сопряжений. Выделены физико-механические свойства пород и параметры основных систем трещин, характерных для апатит-нефелиновых месторождений. Модели представляют собой идеализированный в рамках механики сплошной или дискретной сред массив. Для прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива количественно изучено влияние геометрических и механических факторов на его устойчивость методами численного моделирования в программных комплексах Simulia Abaqus/Standart (Dassault Systemes) и 3DEC (Itasca).

Четвертая глава посвящена разработке методики прогноза нагрузок на крепь и обоснованию параметров крепей сопряжений горных выработок, расположенных в блочных массивах. Предложены зависимости размера зоны возможного обрушения пород на сопряжениях от основных влияющих факторов: фактического пролета сопряжения, параметров структурной нарушенности и начального напряженного состояния массива.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Прогноз напряженно-деформированного состояния приконтурного массива горных выработок при блочном строении массива необходимо выполнять на основании представления массива дискретной средой и задания нелинейной прочности по контакту блоков.

На данном этапе выделены основные факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние и устойчивость приконтурного массива при строительстве горных выработок.

На основании анализа данных физико-механических свойств и структурной нарушенности горных пород апатит-нефелиновых месторождений установлено, что в массивах чаще всего наблюдается более двух систем трещин, при этом образуются отдельности или блоки, характеризующиеся средним размером l , которые могут перемещаться по поверхностям контактов.

Установлено, что в блочных массивах наиболее вероятной

формой потери устойчивости является обрушение породных блоков. Размеры зоны возможного обрушения вокруг одиночных выработок и сопряжений горных выработок находятся в обратной зависимости от показателя RMR и при любом значении показателя RMR линейный размер зоны возможного обрушения на участках сопряжений практически в два раза превышает размеры аналогичной зоны на протяженном участке (рисунок 1). Аналитические методы сложны для решения такого типа задач, а эмпирические подходы не обладают общностью и не всегда могут быть распространены на другие горно-геологические условия. Для достоверного прогноза напряженно-деформированного состояния блочного приконтурного массива необходимо использовать численное моделирование в рамках механики сплошной или дискретной сред.

Из результатов моделирования следует, что характер распределения смещений контура выработки при незначительных деформациях аналогичен для сплошного (рисунок 2, а) и нарушенного (рисунок 2, б) массивов. Однако в пределах зон пониженных напряжений, вследствие возможности перемещения блоков по контактам, значения могут отличаться в несколько раз, что предопределяет возможность формирования зоны обрушения (рисунок 2, в). Таким образом, моделирование массива в рамках механики сплошной среды не позволяет выявить механизм потери устойчивости в блочных массивах и может использоваться только для оценки размеров зон пониженных напряжений.

Влияние выбора математической модели контактного взаимодействия на поведение блоков исследовано в плоской постановке без учета сцепления (рисунок 3). Сравнение с натурными данными, полученными в работах отечественных и зарубежных исследователей, а также с результатами моделирования шероховатости в явном виде показало, что линейный критерий Мора-Кулона некорректно описывает прочность контакта между взаимодействующими блоками. Форма и размеры зоны обрушения также зависят от принятой контактной модели. Закономерности получены для одиночной выработки сводчатой формы поперечного сечения, расположенной в блочном массиве.

Расчетная схема задачи приведена на рисунке 4. Геометрия трещин для каждого случая менялась три раза с сохранением среднего размера блоков l , а контуры зоны возможного обрушения

определялись усреднением полученных результатов. Критерием границы зоны принято раскрытие трещин, равное 0,1 мм, величина которого установлена на основании сравнения с результатами инструментальных измерений размеров зон обрушенных пород. Моделирование в рамках механики сплошной среды с заданием эквивалентных прочностных и деформационных свойств позволяет оценить размер зоны возможного обрушения (рисунок 5) и может использоваться для предварительных расчетов. Использование критериев Кулона-Мора и Бартона-Бандиса для описания свойств по контакту блоков позволяет определить блоки, склонные к обрушению, однако значения при использовании критерия Кулона-Мора завышены.

Дальнейшее изучение влияния геометрических параметров структурной нарушенности на напряженно-деформированное состояние приконтурного массива при выполнении численных расчетов в работе рассматривается с применением нелинейного критерия прочности контакта стенок трещин Бартона-Бандиса.

2. Форма и размер зон возможного обрушения пород на участках сопряжений горных выработок, расположенных в структурно-нарушенных массивах горных пород, определяется пространственной геометрией сопряжения, отношением размера породного блока к фактическому пролету сопряжения и характером начального поля напряженного состояния.

В соответствии с существующими методиками расчет параметров зоны возможного обрушения в окрестности сопряжений горных выработок и расчет параметров крепи осуществляется аналогично выработкам большого поперечного сечения с введением эмпирических коэффициентов формы сопряжения. Необходимость пространственного решения задачи (рисунок 4) обусловлена отличием формы зон возможного обрушения для сопряжений горных выработок разных типов. Формы зон возможного обрушения на рисунке 6, б-е получены аппроксимацией для возможных вариантов систем трещин с изменением угла падения от 0° до 80° и интенсивностью трещиноватости от 0,5 до 10 шт/м. Установлено, что в зависимости от типа сопряжения меняется положение точки максимального размера зоны возможного обрушения.

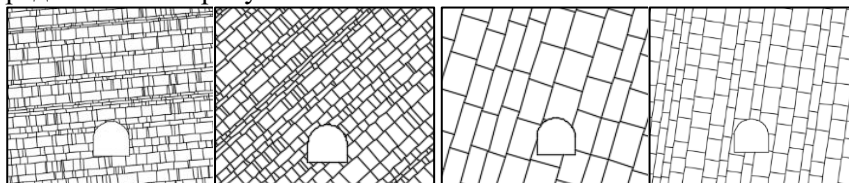
Оценка влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на форму и размеры зон возможного обрушения выполнена для условий апатит-нефелиновых месторождений. Физико-механические свойства пород приняты на основании данных натурных исследований, проведенных АО «ВНИМИ» и СПГУ (таблица 1). Эквивалентные деформационные показатели E_m и ν_m рассчитываются с учетом среднего значения RMR, определенного на основании величины коэффициента структурного ослабления и данных прочности контакта стенок трещин (таблица 2).

Интегральными геометрическими параметрами сопряжения, определяющими его пространственную геометрию, являются расчетный пролет, угол между сопрягающимися выработками и форма кровли. Расчетный пролет сопряжения необходимо определять геометрически, в соответствии с положением точки максимальной величины зоны обрушения, а также с учетом скругления стенок сопрягающихся выработок, обусловленного возникновением зон отжима и технологическими факторами. Угол между сопрягающимися выработками влияет на изменение размера зоны возможного обрушения в пределах 30 %. Оптимальным углом сопряжения является угол, близкий к 90° , однако, если это невозможно обеспечить, то необходимо проектировать сводчатую форму кровли сопряжения, что позволит снизить размер зоны даже при гладких стенках трещин (рисунок 7). Влияние начального поля напряжений на напряженно-деформированное состояние массива проявляется в локализации зон возможного обрушения на контуре горной выработки. В гравитационном поле в своде и почве образуются зоны пониженных напряжений, в случае с плоской кровлей даже растягивающих. При тектоническом характере распределения зоны пониженных напряжений образуются как в кровле, почве, так и в боках выработок. Форма зон возможного обрушения схожа в массивах с различной трещиноватостью, однако интенсивность трещиноватости значительно влияет на ее размер, особенно в массивах, характеризуемых полями напряжений, близкими к гравитационному (рисунок 8). Сводная диаграмма, представленная на рисунке 9, наглядно показывает зависимость размеров зоны возможного обрушения от вышеперечисленных

факторов. Однако, для прогноза необходима количественная интерпретация степени влияния каждого из рассмотренных факторов на формирование зоны обрушения на сопряжении горных выработок.

3. Расчет параметров крепей сопряжений горных выработок должен основываться на результатах прогноза развития геомеханических процессов в массиве горных пород и учитывать его структурную нарушенность, напряженное состояние, тип и размер сопряжения, выраженные через интегральные показатели.

Прогноз нагрузок на крепь сопряжений горных выработок, расположенных в блочных массивах, осуществляется в предположении, что нагрузка формируется весом отделившейся в своде или боках породной массы. Такая ситуация может возникнуть на месторождениях апатит-нефелиновых руд, где массивы характеризуются тектоническим распределением напряжений и структурной нарушенностью, параметры которой приведены в таблице 2. Графическая интерпретация систем трещин I-IV представлена на рисунке 10.



Система I

Система II

Система III

Система IV

Рисунок 10 – Графическое представление трещиноватых массивов с выработкой с пролетом $B=2$ м

Согласно методике, действующей на Кировском руднике, расчет параметров крепи сопряжения в общем случае выполняется на основе определения размера зоны возможного обрушения h_n . Зависимость для определения величины h_n учитывает структурную нарушенность массива через индекс Бартона Q , и геометрические параметры сопряжений через эмпирический коэффициент формы s , при этом в качестве расчетного пролета сопряжения принимается ширина наибольшей из сопрягающихся выработок B .

В диссертационной работе доказано, что достоверный прогноз напряженно-деформированного состояния приконтурного

массива сопряжения и размеров зон возможного обрушения должен выполняться с учетом горно-геологических и горнотехнических факторов. При проектировании выработок с длительным сроком службы необходимо выполнять пространственное численное моделирование с учетом геометрии сопряжения и дискретного строения приконтурного массива. При необходимости выполнения предварительных расчетов достоверным является расчет размеров зоны возможного обрушения по предлагаемой в работе методике.

Методика разработана на основе существующей с учетом полученных зависимостей размера зоны возможного обрушения от влияющих факторов: формы поперечного сечения, начального поля напряжений в массиве и параметров структурной нарушенности массива. Размер зоны возможного обрушения определяется по формуле (1):

$$h_n = \frac{B_\phi}{a \cdot f} \cdot \frac{K_{\text{бл}}}{Q} \cdot K_{\text{ф.кр.}} \cdot K^H \cdot K_\alpha, \quad (1)$$

где B_ϕ – фактический пролет сопряжения, м (рисунок 11); a – полупролет большей из сопрягающихся выработок; f – коэффициент крепости пород по шкале М.М. Протодяконова; Q – критерий Бартона; $K_{\text{бл}}$ – коэффициент относительного размера блока (рисунок 12, а); $K_{\text{ф.кр.}}$ – коэффициент формы кровли, $K_{\text{ф.кр.}} = 1$ для сводчатой кровли, $K_{\text{ф.кр.}} = 1,2$ для плоской кровли; K^H – коэффициент напряженного состояния (рисунок 12, б); K_α – коэффициент влияния угла сопряжения выработок α (рисунок 12, в).

Поправочные коэффициенты определены на основании обработки результатов численного моделирования 288 моделей с изменением рассматриваемых факторов в пределах указанных ранее диапазонов. Значения поправочных коэффициентов определяются в соответствии с зависимостями, приведенными на рисунке 11.

После определения величины h_n выполняется расчет параметров крепи в соответствии с прогнозной нагрузкой. Параметры крепи рассчитываются по формулам, приведенным в соответствующих методиках.

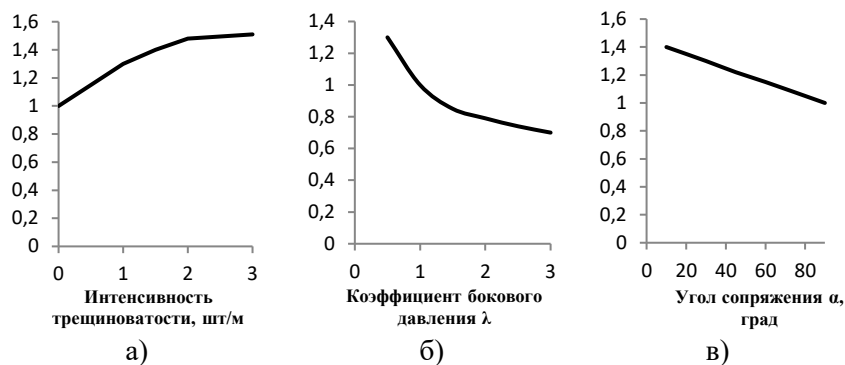


Рисунок 12 – Значения поправочных коэффициентов: относительного размера блока – $K_{\text{бл}}$ (а), напряженного состояния – K^H (б), влияния угла сопряжения выработок α – K_α (в)

Предлагаемая методика применима для массивов с соотношением величин действующих сжимающих напряжений на контуре выработок и предела прочности на сжатие горных пород $\sigma_d/\sigma_c \leq 0,3$, что подразумевает отсутствие хрупкого разрушения.

Апробация методики проведена для условий апатит-нефелиновых месторождений, характеризуемыми системами трещин I-IV (рисунок 10). Интерес для рассмотрения представляют системы I и II, так как средний размер блока в них обуславливает возможность формирования зоны обрушения. На рисунке 13 представлена картина деформирования по сечению фактического пролета четырехстороннего сопряжения со сводчатой и плоской кровлей для систем трещин I и II. Контур зоны возможного обрушения определяется по блокам, хотя бы по двум (в плоской постановке) или по трем (в пространственной постановке) контактными поверхностям которых происходит отрыв или раскрытие трещин более 0,1 мм (рисунок 14). Аналогичным образом определены размеры зон обрушения для всех типов сопряжений (таблица 3). Все сопряжения выработок шириной 4,6 м располагаются на глубине 300 м в массиве с неравнокомпонентным полем напряжений, где $\lambda_1 = 1,5$; $\lambda_2 = 2$, характеризуемом системой трещиноватости I.

Таблица 3 – Сводная таблица значений по существующей и предлагаемой методикам

Тип сопряжения	Размер нарушенной зоны h_n , м			ЧМ/ СМ %	ЧМ/ ПМ %
	СМ	ПМ	ЧМ		
Тип А, сводчатая кровля	0,85	0,9	0,95	12	6
Тип А, плоская кровля	0,85	1,1	1,2	41	9
Тип Б	0,8	1,13	1,15	44	2
Тип В, $\alpha = 30^\circ$	0,8	1,17	1,1	38	-6
Тип В, $\alpha = 45^\circ$	0,8	0,95	1,0	25	5
Тип В, $\alpha = 60^\circ$	0,8	0,98	0,93	16	-5
Тип Г	0,8	0,87	0,9	13	3

Примечание: СМ – существующая методика, ПМ – предлагаемая методика, ЧМ – численное моделирование.

Результаты расчетов, представленные в таблице 3, показали, что размеры зоны по действующей в настоящее время методике могут быть как завышенными, так и заниженными в некоторых случаях до 1,5 раз. Предлагаемая методика не вступает в противоречие с нормативной методикой, а погрешность в определении размеров зон возможного обрушения находится в пределах 10 %, что позволяет скорректировать параметры крепей сопряжений горных выработок (рисунок 15) на этапе проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – выявления закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния структурно-нарушенного массива горных пород для условий месторождений апатит-нефелиновых руд и повышения достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок, расположенных в таких условиях.

В диссертационной работе представлены результаты пространственного численного моделирования нескольких типов сопряжений горных выработок для условий блочных массивов апатит-нефелиновых месторождений. По результатам выполнения

диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выполненные исследования подтвердили, что в блочных горных массивах наиболее вероятной формой потери устойчивости на контуре горной выработки является обрушение пород в зоне, качественно совпадающей с зоной пониженных напряжений.

2. Для повышения достоверности прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений необходимо выполнять оценку структурной нарушенности и параметров зоны возможного обрушения в каждом конкретном случае.

3. Форма и размеры зоны возможного обрушения на сопряжении горных выработок зависят от геометрических параметров выработок и физико-механических свойств массива горных пород, наибольшее влияние оказывает напряженное состояние массива и пространственная геометрия структурных нарушений.

4. В рамках работы представлен алгоритм выбора параметров численных моделей для моделирования геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок, а также обоснование применения нелинейного критерия прочности Бартона-Бандиса для описания взаимодействия контакта стенок трещин.

5. Прогноз формирования зоны возможного обрушения должен выполняться в пространственной постановке методами численного моделирования в рамках механики дискретной среды для возможности моделирования взаимного перемещения блоков по контактными поверхностям. Критерием границы зоны принято раскрытие трещин, равное 0,1 мм, величина которого установлена на основании сравнения с результатами инструментальных измерений размеров зон обрушенных пород.

6. На основании полученных данных выполнено обоснование поправочных коэффициентов для систем трещин с изменением угла падения от 0° до 80° и интенсивностью трещиноватости от 0,5 до 10 шт/м, определяющих отличие формы зон возможного обрушения для сопряжений горных выработок разных типов.

7. В рамках диссертационной работы разработаны методические положения построения численных моделей для оценки

размера зоны возможного обрушения для участков сопряжений с учетом всех рассмотренных факторов, что позволяет повысить точность прогноза параметров зоны возможного обрушения до 98 %.

Разработанные рекомендации позволят повысить геомеханическую безопасность при строительстве и эксплуатации сопряжений горных выработок в структурно-нарушенных массивах горных пород при разработке апатит-нефелиновых месторождений.

Перспективным направлением развития научных исследований по тематике диссертации является развитие теоретических основ построения структурно нарушенных породных массивов на основании данных инструментальных замеров, геофизических данных, а также применение статических и вероятностных моделей, совмещение которых с разработанной методикой прогноза напряженно-деформированного состояния массива как дискретной среды позволит в значительной степени повысить достоверность прогноза геомеханических процессов в окрестности породных обнажений и, в частности, сопряжений горных выработок.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Сотников Р.О. Прогноз воздействия динамических проявлений горного давления на устойчивость породных обнажений / Р.О. Сотников, **М.А. Вильнер** // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2020. - № 6 специальный выпуск 21. - С. 3-13. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-21-3-13.
2. Протосеня А.Г. Прогноз напряженно-деформированного состояния дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи в трещиноватых массивах / А.Г. Протосеня, **М.А. Вильнер** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2021. - № 5 (147). - С. 5-14. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14.
3. Синегубов В.Ю. Оценка влияния очистных работ на формирование нарушенных зон в массиве на контуре выработки большого сечения в условиях апатит-нефелиновых месторождений / В.Ю. Синегубов, М.Г. Попов, **М.А. Вильнер**, Р.О. Сотников // Горный журнал. - 2021. - № 2021 (8). - С. 26-30. DOI: 10.17580/gzh.2021.08.04.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы

данных и системы цитирования (Scopus):

4. Karasev, M.A. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks / M.A. Karasev, M.A. Bouslova, **M.A. Vilner**, T.T. Nguen // Journal of Mining Institute. - 2019. - №240. - С. 628-637.

5. Vilner, M. The assessment of the roof beam stability in mine workings / M. Vilner, T.T. Nguen, P. Korchak // Scientific reports on resource issues. - 2019. - №1. - С. 53-57. DOI: 10.1201/9781003017226-7.

Публикации в прочих изданиях:

6. **Vilner M.** Assessment of the stability of mines during development of mineral deposits in overpressed rock masses // Ksiązka abstraktow 59 KSKNPG AGH. - 2018. - С. 63.

7. Протосеня А.Г. Прогноз устойчивости породных обнажений, располагаемых в структурно-нарушенных массивах рудников КФ АО «Апатит» / А.Г. Протосеня, **М.А. Вильнер**, Р.О. Сотников // Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции 05-06 марта 2020 г. - С. 1569-1575.

8. **Вильнер М.А.** Геомеханический прогноз напряженно-деформированного состояния на сопряжениях в трещиноватых слабонапряжённых массивах // Сборник докладов XVIII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. - 2020. - С. 183.

9. **Вильнер М.А.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трещиноватых породных массивов на участках сопряжений горных выработок // Сборник материалов по результатам исследовательских стажировок в рамках программ «Михаил Ломоносов» и «Иммануил Кант», 2020-2021 г. - С. 58-63

Патенты:

10. Патент № 2760451 Российская Федерация, МПК E21D 1/16 (2006.01), E21D 11/10 (2006.01), E21B 33/13 (2006.01). Способ упрочнения трещиноватых пород при строительстве сопряжений горизонтальных горных выработок: № 2021114701 : заявл. 25.05.2021 : опубл. 25.11.2021 / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, В.Ю. Синегубов, **М.А. Вильнер** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU). – 5 с. : ил.

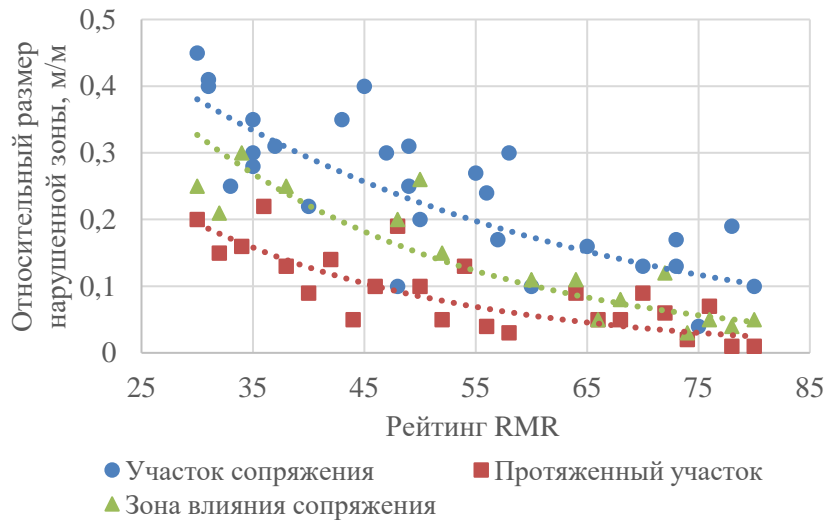


Рисунок 1 – График зависимости размеров зоны возможного обрушения от показателя RMR: 1 – участок протяженной выработки; 2 – участок сопряжения

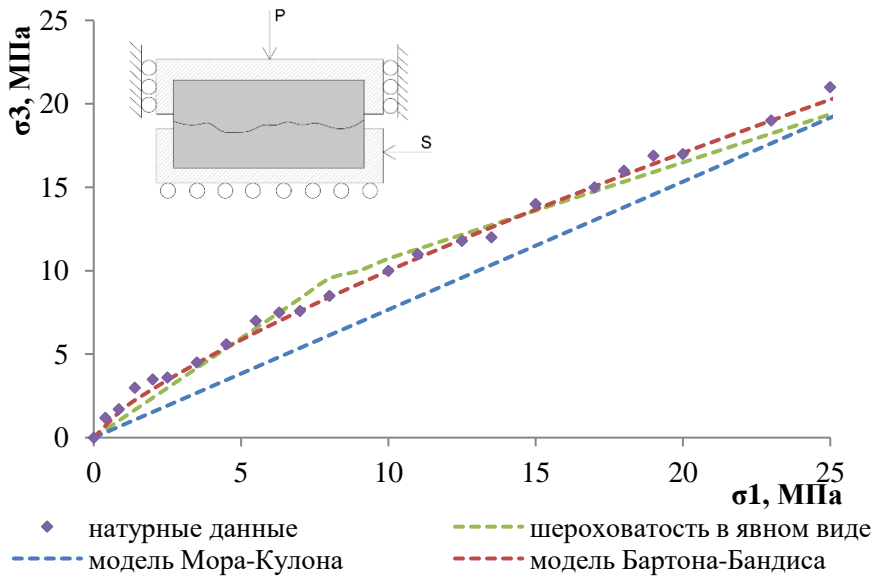


Рисунок 3 – Исследование достоверности математических моделей контактного взаимодействия

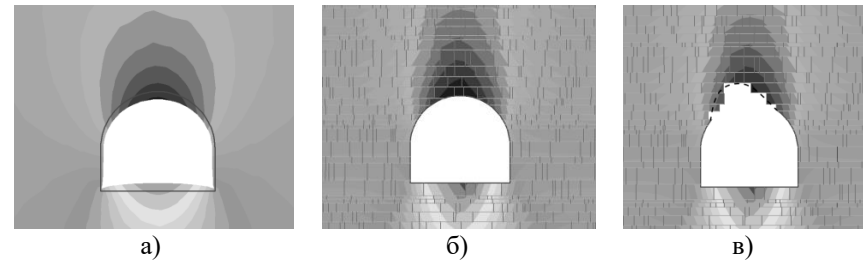


Рисунок 2 – Эпюры смещений для выработки, расположенной в сплошном (а) и нарушенном (б, в) массивах

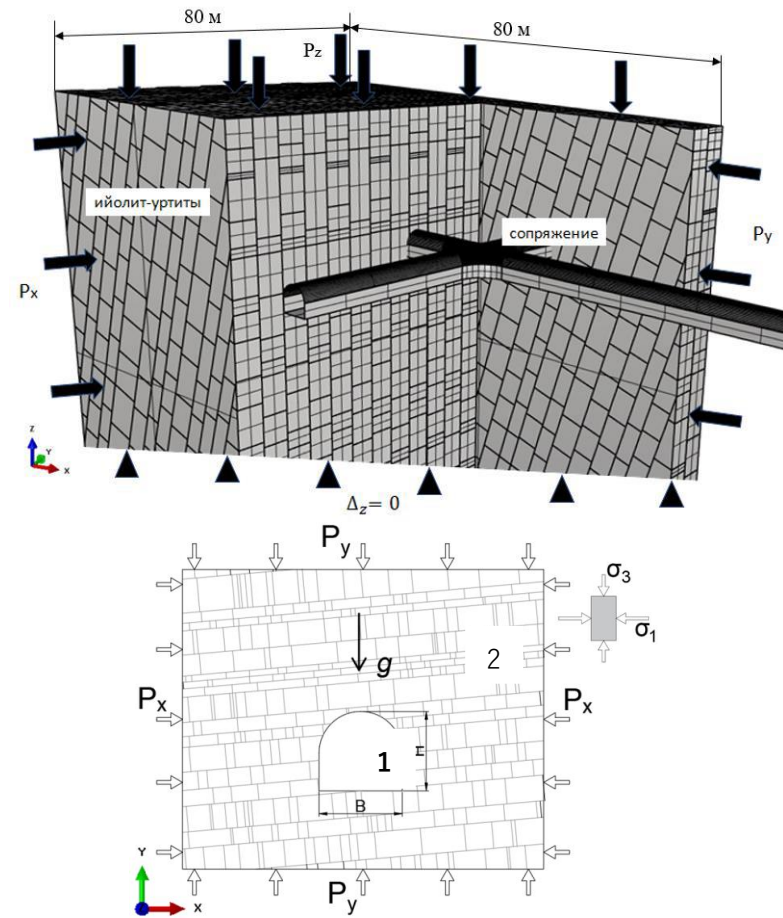


Рисунок 4 - Расчетная схема задачи: 1 – горная выработка; 2 – блочный вмещающий массив, P_x и P_y – горизонтальные и вертикальные напряжения соответственно, В и Н – ширина и высота выработки соответственно

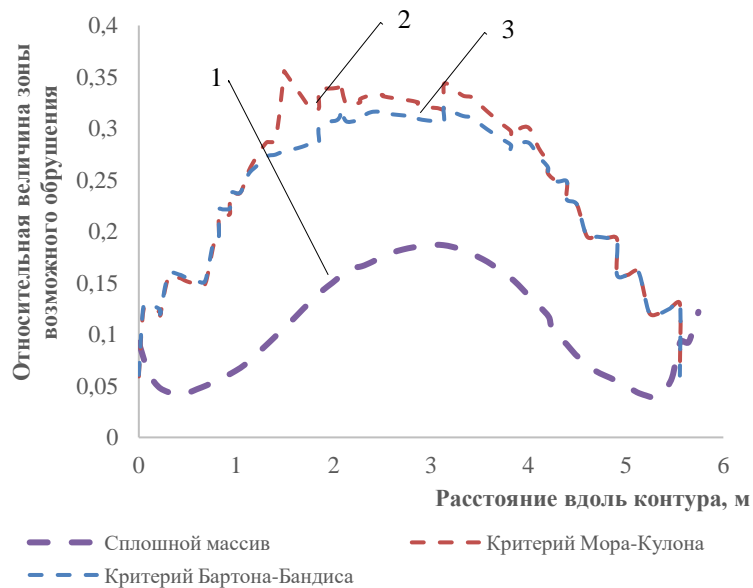


Рисунок 5 – Контуры зон возмолжного обрушения для сплошного массива (1), контактной модели Мора-Кулона (2) и Бартона-Бандиса (3)

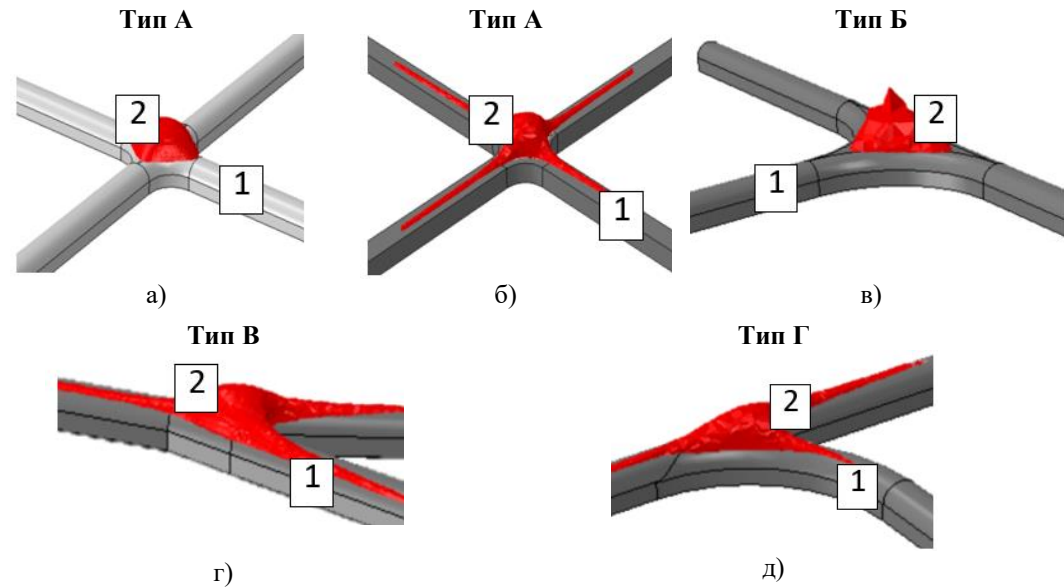


Рисунок 6 – Формы вывалов для четырехстороннего сопряжения сводчатой (а) и прямоугольной (б) форм, трехстороннего сопряжения (в), разветвления выработок под углом α (г), бокового ответвления (д); P_x, P_y, P_z – горизонтальные вкрест и вдоль простирания и вертикальные напряжения соответственно, 1 – горная выработка, 2 – зона возмолжного обрушения

Таблица 1 – Физико-механические свойства пород и руд, принятые в численном моделировании

Наименование породы	Рисчорриты	Уртиты	Апатит-нефелиновая руда
Удельный вес γ , МН/м ³	0,028	0,028	0,030
Модуль упругости E , МПа	65 300	40 680	58 125
Коеффилент Пуассона ν	0,26	0,24	0,20
Сцепление c , МПа	33,6	31,7	20,3
Угол внутреннего трения ϕ	41,0	38,5	44,9
Коеффилент структурного ослабления	0,6	0,55	0,55
Показатель RMR	58	50	51
Модуль упругости в массиве E_m , МПа	20 335	10 144	14 902
Коеффилент Пуассона в массиве ν_m	0,33	0,33	0,33

Таблица 2 – Параметры систем трещин в пределах апатит-нефелиновых месторождений согласно исследованиям ВНИМИ

№ системы	Ср. угол падения	Ср. азимут	Интенсивность, шт/м	Раскрытие, мм	Ср. размер блоков, м
I	5	355	5-10	1-2	0,1x0,1x0,2
II	42	9	3	5-20	0,3x0,5x1
III	73	255	0,2	5-15	2x2x4
IV	82	116	0,8	до 0,5	1x1x2

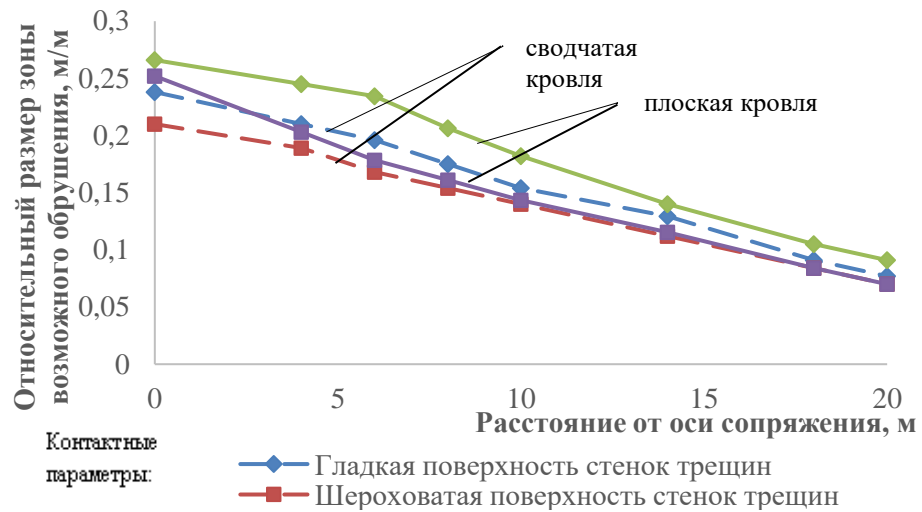


Рисунок 7 – График зависимости размера зоны возможного обрушения в зависимости от расстояния до оси сопряжения

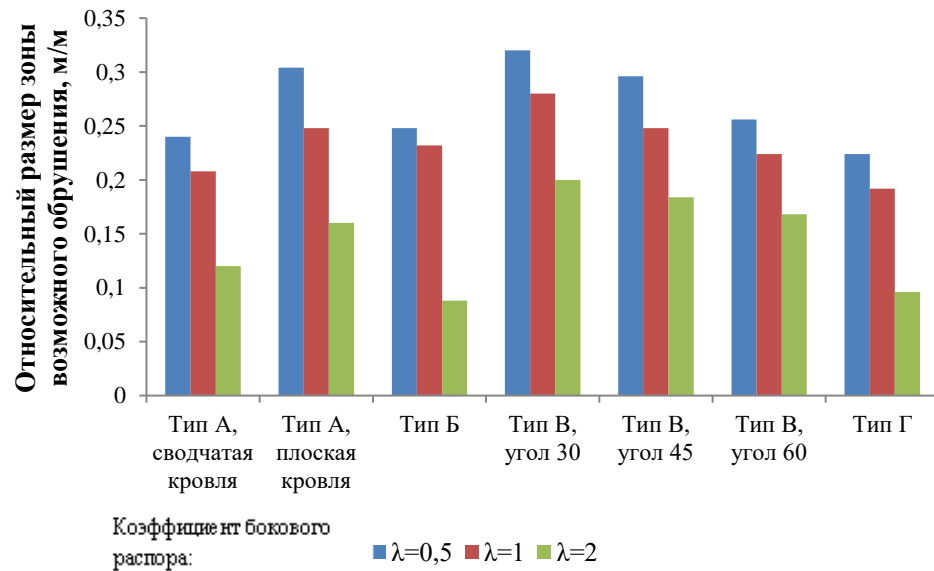


Рисунок 9 – Диаграмма размеров зоны возможного обрушения для различных типов сопряжений горных выработок в зависимости от коэффициента бокового распора λ

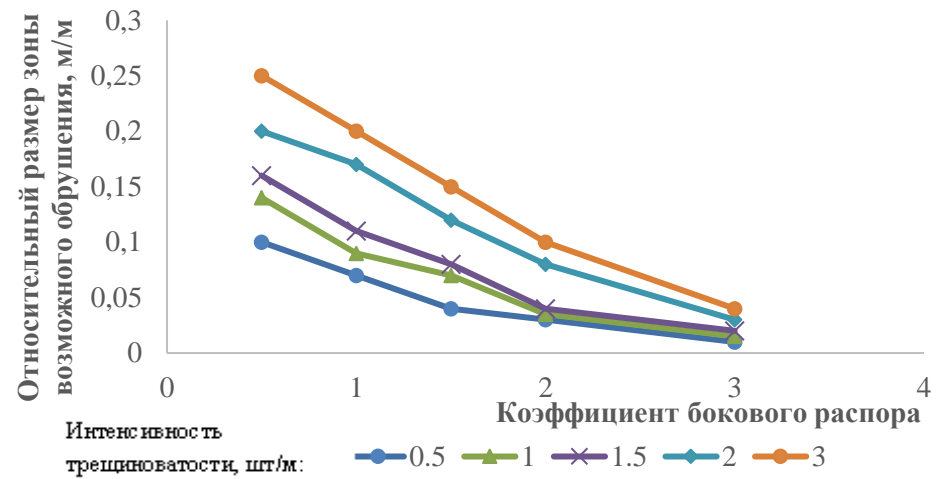


Рисунок 8 – Графики зависимости размера зоны возможного обрушения на сопряжении типа А от коэффициента бокового распора λ для различных величин интенсивности трещиноватости, шт/м

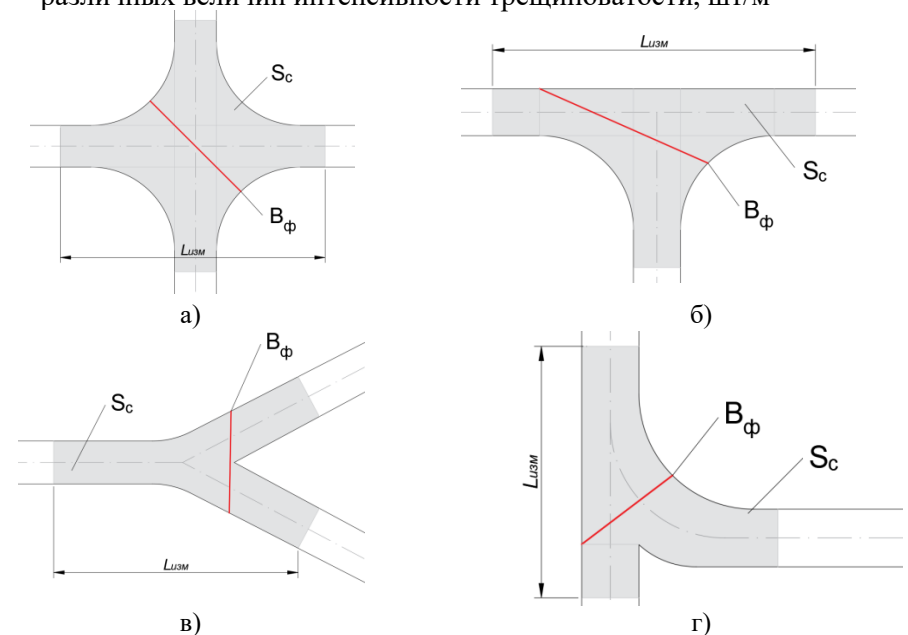


Рисунок 11 – Схемы к определению расчетного пролета для четырехстороннего (а), трехстороннего (б) сопряжения, разветвления под углом α (в), бокового ответвления (г)

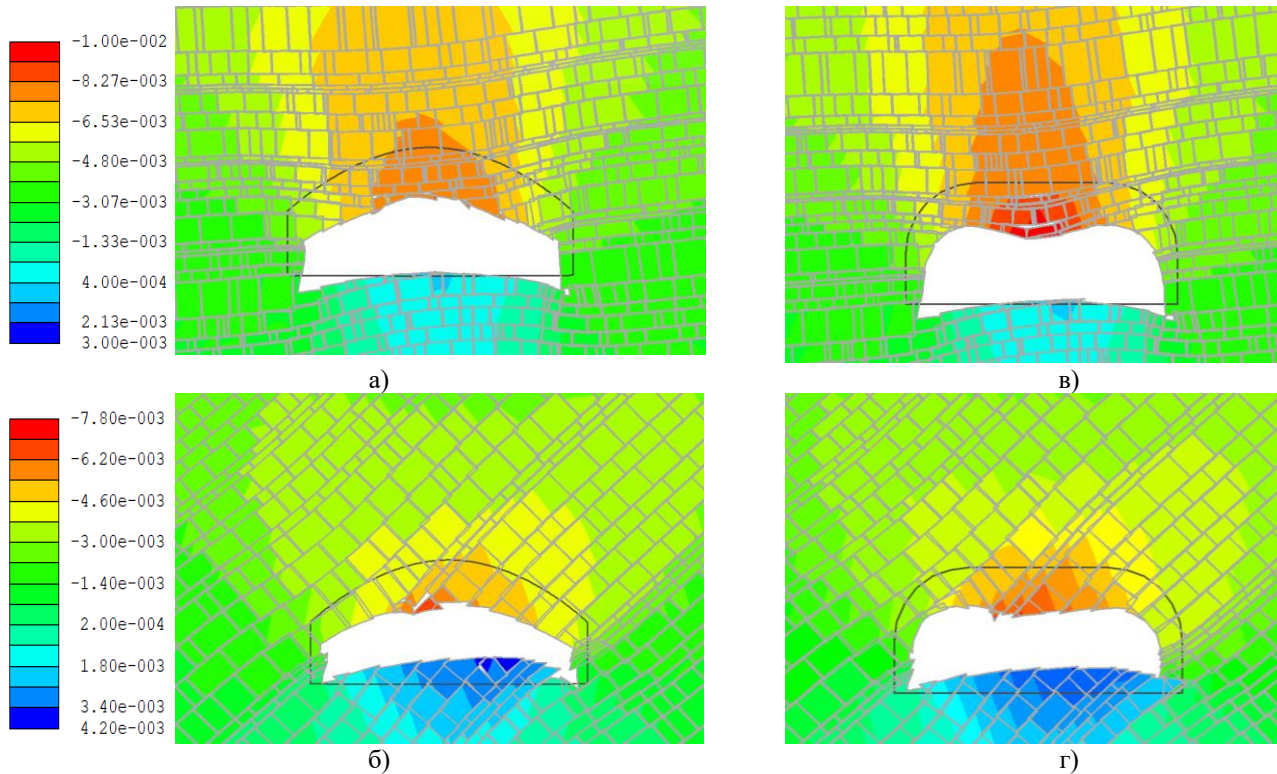


Рисунок 13 – Эпюры напряженно-деформированного состояния массива (смещения, м) в окрестности сопряжений в массивах, характеризуемыми системами трещин I (а, б) и II (в, г)

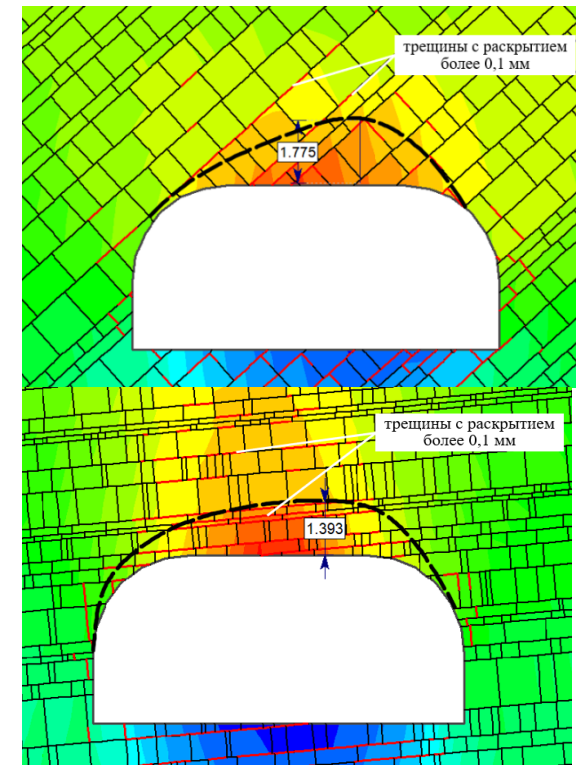


Рисунок 14 – Определение границ зоны возможного обрушения на недеформированном контуре

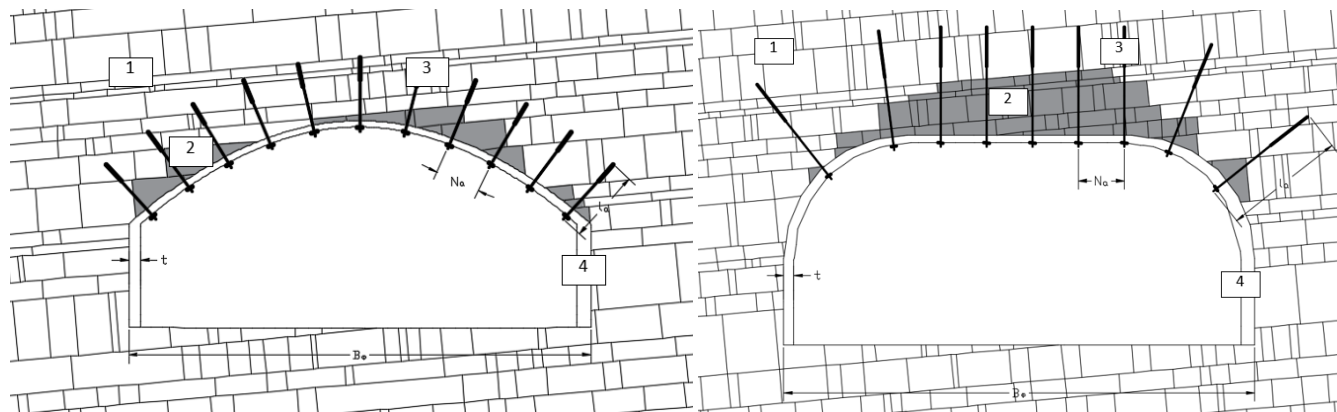


Рисунок 15 – Параметры зоны обрушения и крепи для сопряжения по сечению расчетного пролета для типа А, сводчатая кровля (а) и для типа А, плоская кровля (б)

- 1 – вмещающий массив;
- 2 – зона обрушения;
- 3 – железобетонный анкер;
- 4 – набрызгбетонная крепь;
- B_{ϕ} – фактический пролет;
- t – толщина крепи, м;
- l_a – длина анкера, м;
- N_a – шаг анкеров