

На правах рукописи

ВЕРБИЛО Павел Эдуардович



**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ В БЛОЧНОМ ГОРНОМ
МАССИВЕ**

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

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

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор

Протосеня Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты:

Ашихмин Сергей Геннадьевич,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем», профессор

Лебедев Михаил Олегович,

кандидат технических наук, ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе

Ведущая организация – ООО «Институт Гипроникель»

Защита состоится 26 сентября 2018 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 26 июля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Надежная оценка механического состояния, прочностных и деформационных характеристик блочного горного и рудного массивов, основанная на сочетании натуральных и численных экспериментов, аналитических исследований, составляет основу для проектных решений при разработке технологических схем добычи полезного ископаемого. Геомеханическое обоснование проектных решений с учетом структурных особенностей блочного массива на сегодняшний день является одной из наименее решенных в методическом отношении проблемы, так как основная сложность в методике оценки влияния трещиноватости на свойства массивов связана с трудностями комплексного учета геологических факторов, неясностью пути перехода от результатов лабораторных экспериментов над горными породами к механическим характеристикам массива, учета механизма разрушения реального блочного массива горных пород.

Актуальность изучения механических процессов в рудных и горных массивах, имеющих блочное строение, обуславливается сложностью поставленной задачи на современном этапе развития горного производства, когда добыча полезных ископаемых осуществляется во все более сложных горно-геологических условиях (большие глубины, структурные геологические нарушения породных массивов, проявления высокого горного давления), так как имеет место тенденция увеличения глубины горных работ в горнодобывающей промышленности. Увеличение интенсивности проявления горного давления влечет за собой рост требований к точности прогноза ожидаемых его проявлений. Таким образом, количественная оценка влияния нарушенности на величину прочностных и деформационных характеристик породного массива, определение размеров элементарного репрезентативного объема массива, определение масштабного эффекта механических характеристик, оценка несущей способности целиков являются актуальными задачами исследований.

Вопросами строения трещиноватых массивов, исследованию его механических характеристик, природного напряженного состоя-

ния посвящены работы А.Н. Ставрогина, С.Б. Ухова, С.Н. Чернышева, И.В. Баклашова, Г.Н. Кузнецова, М.Г. Зерцалова, Лиянянг Жанг, Д. Хадсона, Б.Х.Г. Брэди, В. Виттке, А.К. Черникова, Д. Эльмо, Д. Джагера и др. Разработке аналитических методов посвящены работы К.В. Руппенейта, А.Г. Протосени, С.Г. Ашихмина, Д. Уолша, Р. Гудмана, В.П. Мерзлякова, А.Н. Власова.

Разработке классификаций для трещиноватых массивов и эмпирических методов посвящены работы таких авторов, как М.М. Протодьяконов, Трушко В.Л., Козырев А.А., В.С. Эристов, Е.М. Пашкин, Д. Дир и Р. Миллер, З. Бениявски, Р. Гудман, И.А. Турчанинов, К. Терцаги, Х. Лауффер, Коттисс, Д. Эльмо, Э. Хоек, Браун, А. Пальмстрём и др. Сформулирован список факторов, количественно оказывающих влияние на величину прочностных и деформационных характеристик горного массива (ISRM, З. Бениявски, Н. Бартон, Р. Миллер и др.). Различные системы трещиноватости отражены в классификационных системах, разработанных Л. Мюллером, М.В. Рацом, В.Н. Бурлаковым, Н.С. Булычевым, С.Б. Уховым, Х. Боком, С.Н. Чернышевым и др. Наиболее популярны в инженерной практике многопараметрические классификации трещиноватых пород, такие, как Rock Mass Rating (RMR) и Q-system, являющиеся продуктом статистической обработки данных о устойчивых и неустойчивых размерах подземных выработок в различных горно-геологических условиях, при этом отечественных месторождений в выборках указанных систем нет. Но основным недостатком классификационных схем является невозможность явного учета в задаче трещиноватости, так как влияние трещин в системах учитывается через эмпирические коэффициенты. Аналитические подходы не позволяют учесть сложное строение горного массива и таким образом решить поставленные задачи.

Применением численных способов решения геомеханических задач, связанных с трещиноватым горным массивом, занимались такие ученые, как Зубков В.В., М. Цай (M. Cai), К. Эдельбро (C. Edelbro), К. Эсмаиэли (K. Esmaili), К. Фарахманд (K. Farahmand), Янг Джиан-Пинг (Yang Jian Ping), А. Хани (A. Khani), Ли Янгронг (Li Yanrong), А. Лисьяк (A. Lisjak), Мин Ки-Бок (Min Ki-Bok), Ванг Ксионганг (Wang Xiao-Gang) и др.

Цель работы: создание метода прогноза геомеханического состояния блочных рудных целиков при разработке месторождений апатит-нефелиновых руд.

Идея работы. Прогноз геомеханических процессов блочного рудного массива должен основываться на моделях среды, учитывающих строение и структуру массива, нелинейность поведения при механическом воздействии, условия взаимодействия блоков горной породы по контактам.

Основные задачи исследований:

- анализ существующих методов исследования массивов пород, нарушенных системами трещин, и способов оценки их геомеханических параметров. Определение границ применимости современных методов численного моделирования массивов для различных типов трещиноватости;

- разработка численных моделей деформирования и разрушения блочных рудных массивов в рамках метода конечных элементов при представлении массива в виде дискретной среды и проведение численных экспериментов по исследованию механических характеристик блочных массивов с использованием разработанной модели;

- апробация предложенной геомеханической модели и разработка концепции проведения геомеханического анализа для прогноза несущей способности междукамерных целиков в блочном рудном массиве с применением численных методов моделирования;

- разработка рекомендаций по моделированию блочного рудного массива, выбору конструктивных параметров междукамерных целиков.

Объектом исследования является блочный горный массив, формируемый отдельными блоками горной породы или руды.

Методы исследований. При выполнении работы использовалась комплексная методика исследований, включающая анализ литературных источников, результатов лабораторных экспериментов, выполненных специализированными организациями, материалов геологической разведки месторождения Плато Расвумчорр рудника ОАО «Апатит», способов вычисления механических характеристик блочного горного массива и несущей способности междукамерных целиков, численное моделирование геомеханических процессов в

блочном горном массиве, включающие уравнения теории упругости, пластичности и элементы механики дискретного тела, где строение массива в численной модели учитывается в явном виде за счет построения объемных геометрических элементов блоков.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- выявлены закономерности изменения несущей способности целика в блочном рудном массиве в зависимости от его строения и структуры для условий месторождений апатит-нефелиновых руд;

- установлена взаимосвязь между прочностными характеристиками блочного рудного массива и размерами его рассматриваемого участка, которая заключается в уменьшении прочности на сжатие с увеличением размера массива до формирования репрезентативного объема массива;

- выявлены закономерности анизотропии механических характеристик блочного рудного массива, заключающиеся в изменении его прочностных и деформационных характеристик.

Основные защищаемые положения.

1. Прогноз процессов деформирования и разрушения блочного рудного массива необходимо выполнять на основе численной модели, учитывающей форму, расположение блоков и их физико-механические свойства, условия по контактам взаимодействия.

2. Определяющим фактором снижения несущей способности целика в блочном рудном массиве при увеличении его размеров или изменении угла наклона трещиноватости является неоднородность распределения напряжений и деформаций внутри него.

3. Для выбора геомеханически безопасных параметров междукамерных целиков в блочном рудном массиве необходимо использовать разработанную методику прогноза их геомеханического состояния, позволяющую учитывать их строение и размеры, анизотропию и масштабный эффект механических характеристик.

Практическая значимость работы.

- Разработана методика расчета несущей способности междукамерных целиков в блочном горном массиве и его механических характеристик.

- Разработана численная геомеханическая модель блочного горного массива, позволяющая изучать развитие геомеханических процессов в виде разрушения за счет образования и развития трещин отрыва и сдвига.

- Разработаны методики вычисления масштабного эффекта и анизотропии механических характеристик блочного горного массива в существующих программных комплексах в рамках механики дискретной среды с использованием метода конечных элементов.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается удовлетворительной схожимостью результатов натуральных наблюдений и экспериментов по исследованию прочности блочного горного массива и вмещающих целиков в сопоставимых инженерно-геологических условиях, применением современных методов механики сплошных и дискретных сред, методов математического анализа для построения геомеханических моделей блочной среды.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований были представлены на научных конкурсах и конференциях в 2014-2018 гг.: международном европейском симпозиуме EuroGosc-2018 г. (Горный университет, г. Санкт-Петербург, 2018 г.), международном форуме-конкурсе «Проблемы недропользования» (Горный университет, г. Санкт-Петербург, 2018 г.), VIII международной научно-практической конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), международной научной-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», посвященной 185-летию кафедры «горное искусство» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), международной научно-практической конференция «Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), международном форуме-конкурсе «Проблемы недропользования» (Горный университет, г. Санкт-Петербург, 2016 г.), международной

научной конференции «Неделя науки в СПбПУ» (Санкт-Петербург, СПбПУ, Россия, 2015 г.), международной научной школе молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2015 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России – 3 статьи.

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследований; в разработке математических моделей блочного горного массива и их численной реализации; выполнении численных экспериментов и анализе полученных результатов; обосновании методики вычисления механических характеристик блочного рудного массива; в разработке практических рекомендаций по вычислению несущей способности междукамерных целиков, масштабного эффекта и анизотропии механических характеристик блочного массива.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 162 наименования, изложена на 150 страницах машинописного текста и содержит 132 рисунка, 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обосновывается актуальность её проведения, поставлены цель и задачи исследований, сформулированы идея работы, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе раскрывается содержание объекта исследования (его анализ и описание), приводится его характеристика, описание и анализ разработанных на сегодняшний день подходов для исследования трещиноватого горного массива, обосновывается актуальность дальнейших исследований. В заключительной части первой главы формулируются основные задачи для достижения поставленной в диссертационной работе цели исследований.

Во второй главе изложены теоретические основы широко используемых методов для вычисления механических характеристик блочного (трещиноватого) горного массива (натурный и лаборатор-

ный эксперимент, аналитические и эмпирические методы), подходов при проектировании междукамерных целиков. В конце главы проведен обзор основных теоретических основ использования численных методов моделирования для решения поставленных задач, используемых в диссертационном исследовании, а также метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Simulia Abaqus, использующийся для моделирования блочного горного массива и проведения комплексного исследования его механического поведения.

В третьей главе выполнено изучение влияния пространственной ориентации системы трещиноватости, соотношения вертикального и бокового давления на механические характеристики блочного рудного массива, изучены анизотропия и масштабный эффект механических характеристик.

В четвертой главе изучены особенности работы междукамерных целиков в блочном горном массиве, определено влияние соотношения сторон целика (ширина/высота) на его механические характеристики, произведено вычисление несущей способности междукамерных целиков при разработке месторождений полезных ископаемых, а также даны рекомендации по выбору безопасных параметров целиков, обеспечивающих устойчивость.

В заключении представлены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения исследований, которые отражены в нижеследующих защищаемых положениях.

1. Прогноз процессов деформирования и разрушения блочного рудного массива необходимо выполнять на основе численной модели, учитывающей форму, расположение блоков и их физико-механические свойства, условия по контактам взаимодействия.

Процессы деформирования и разрушения блочного массив сопровождаются формированием, развитием и распространением трещин, поверхности которых по мере их роста взаимодействуют между собой, формируя сложную систему взаимосвязанных элементов, при этом проявляется дилатансионный эффект. Реализация в численной постановке такой задачи выполнена за счет воспроизведения

в модели строения массива в явном виде, для чего использовалось математическое моделирование методом конечных элементов, выполненное в программном комплексе Simulia Abaqus, где прочность горной породы определялась упруго-пластической моделью Кулона-Мора, для описания механического поведения по контакту взаимодействия блоков горной породы использовался нелинейный критерий прочности Бартона. основополагающим фактором при выборе модели являлось то, что рассматриваемый блочный массив разрушается вследствие наличия в нем трещин, вдоль которых происходят основные дестабилизирующие сдвиговые деформации, а блоки горной породы, образующие массив, не достигают предельного состояния прочности. Конечно-элементная сетка включает один тип сплошных элементов в блоках горной породы, который отвечает за деформирование материала на допредельной стадии, так как считается, что предельное состояние блоки горной породы не достигают: на локальном уровне в модели блок горной породы работает как упруго-пластическая среда, а его пластическое поведение добавлено с целью идеализирования процесса разрушения блоков по контактам взаимодействия. При этом для моделирования связи между напряжениями и деформациями возможно использование существующих моделей поведения материалов, разработанных в рамках линейной и нелинейной теорий упругости.

С целью проведения численных экспериментов выбран имеющий блочное строение Хибинский массив, из которого выделялись целики различного геометрического строения. Для численного моделирования использовались следующие физико-механические характеристики горной породы: $\rho=2760 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости, $E=5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu=0.255$, угол внутреннего трения $\varphi=27^\circ$, сцепление $c=30 \text{ МПа}$. Для моделирования взаимодействия блоков горной породы по контакту использовались следующие величины показателей: остаточный угол внутреннего трения составляет 27 градусов, сцепление 795 Па , прочность на сжатие материала стенки трещины 20 МПа , коэффициент шероховатости при использовании нелинейного критерия прочности Бартона поверхности взаимодействия блоков равен 18 . Для исследования выбраны три системы трещиноватости (рисунок 1), которые формируют блочную

структуру массива с размерами блоков: от 0,02×0,05×0,03 до 1×1,5×1 м, определенные по результатам детального изучения месторождения Плато Расвумчорр с помощью стереографических поверхностей и картирования трещиноватости.

Расчетная схема (схема заданных деформаций), использованная в работе указана на рисунке 2, где опорная часть модели в виде абсолютно жесткой пластины закреплена в неподвижном состоянии, к модели массива с помощью абсолютно жесткой пластины, находящейся сверху, передаются напряжения за счет ее перемещения вниз. Таким образом блочный массив, располагающийся между жесткими пластинами, подвергается нагрузке с последующей деформацией и перераспределением напряжений до момента потери несущей способности. Расчетная схема предусматривает приложение бокового давления (P) (рисунок 2, 2). Реализация процесса деформирования дискретного тела при численном моделировании происходила по явной схеме интегрирования во времени. Использование нелинейного критерия прочности Бартон (1) по контакту поверхностей блоков горной породы, где прочность на сдвиг является функцией достигнутой величины нормальных напряжений на площадках взаимодействия блоков горной породы, при моделировании в программном комплексе Abaqus позволяет получить высокую сходимость с экспериментальными данными, погрешность при этом составляет не более 0,5 % (рисунок 3):

$$\tau_{\text{пр}} = \sigma_n \cdot \text{tg}(JRC \cdot \lg \frac{JCS}{\sigma_n} + \varphi_{\text{ост}}), \quad (1)$$

где JRC - коэффициент шероховатости трещин; JCS -прочность на сжатие материала стенки трещины, МПа; σ_n - нормальное действующее напряжение, МПа; $\varphi_{\text{ост}}$ - остаточный угол трения, градусы.

В численной модели анизотропия механического поведения блочного массива учитывается через полное структурное отображение строения массива, задания нелинейной диаграммы изменения прочности сдвигу от величины нормальных напряжений, действующих по площадкам взаимодействия блоков горной породы в модели.

При исследовании механического поведения блочного горного массива с приложением боковых напряжений прочность последнего увеличивалась за счет противодействия развитию трещин сдвига и

отрыва, так как боковое давление приводит к уплотнению и усложнению процесса дискретизации блочной среды (рисунок 4). Качественный анализ результатов численных экспериментов в условиях вертикального сжатия позволил установить, что характер разрушения модели зависит от направления его нагружения в зависимости от ориентации системы трещиноватости в пространстве, наличия боковой нагрузки.

Прогноз процессов деформирования и разрушения блочного рудного массива выполнялся на основе разработанной численной модели, учитывающей форму, расположение блоков и их свойства, условия по контактам взаимодействия, что позволяет моделировать зоны концентрации напряжений и процесс разупрочнения блочной среды по мере развития трещиноватости. В таком случае зависимость деформирования блочного массива σ - ε имеет нелинейный вид, а в общем случае при идеализации может быть описана упругопластической (рисунок 4) и жесткопластической (рисунок 5) моделями прочности в зависимости от структуры массива, где происходит накопление напряжений в образце массива до предельного значения и возникновение площадок сдвига и реализации по ним необратимых сдвиговых разрушающих деформаций с последующей потерей несущей способности массива. Трещины сдвига и отрыва развиваются в направлениях действия максимального главного сжимающего напряжения, в случаях, когда развитие осложняется строением структуры массива, прочность массива возрастает. Таким образом, массив в модели работает как дискретная среда на допредельной и запредельной стадиях деформирования и при этом допускается возможность распространения трещин отрыва и трещин сдвига, физическое обоснование подобного процесса подробно рассмотрено в работах А.Н. Ставрогина и обобщено в виде модели деформаций в неоднородном твердом теле.

Апробация предложенного метода прогноза деформаций и разрушения блочного массива выполнялась на основании сравнения результатов численных экспериментов и применения аналитических, эмпирических зависимостей. Таким образом, при представлении массива дискретной средой, применение метода конечных элементов позволяет изучать процессы деформирования и

разрушения блочного горного массива, происходящие в следствие его нагружения и обусловленные развитием трещин отрыва и сдвига, и вычислять механические характеристики по полученным графикам деформирования в осях σ - ϵ .

2. Определяющим фактором снижения несущей способности целика в блочном рудном массиве при увеличении его размеров или изменении угла наклона трещиноватости является неоднородность распределения напряжений и деформаций внутри него.

Для изучения анизотропии механических характеристик целиков в трещиноватом горном массиве были построены модели с шириной 4 м и высотой 8 м. Вращение угла наклона трещиноватости производилось с шагом 15 градусов (пример на рисунке 6). Для изучения влияния ширины целика на его несущую способность при постоянной высоте (8 м) были построены модели с варьированием изменяемого параметра от 3 до 7 метров с шагом 1 м. Для изучения влияния высоты целика на его несущую способность при постоянной ширине (4 м) были построены модели с варьированием высоты от 3 до 10 метров с шагом 1 м. Для изучения масштабного эффекта механических характеристик исследуемого объекта были построены модели с шириной от 1 до 10 м и пропорционально определяемой высотой по следующим соотношениям: 1:1, 1:1.5, 1:2 (рисунок 7).

Характер распределения напряжений в блоках по контактам взаимодействия существенно отличается от визуализированного представления напряженного состояния однородного массива. Сформированные в определенную структуру блоки горной породы в массиве за счет наличия трещин становятся определяющим фактором, обуславливающим анизотропию механических характеристик (рисунки 8-10), так как в случае изменения пространственной ориентации рассматриваемой системы трещиноватости при прочих равных граничных условиях, происходит геометрическое изменение контактных условий, направлений площадок трещин, передающих нагрузку на соседние блоки. В результате происходит изменение «рабочей» площади сечения блочного массива, расположение зон повышенных и пониженных напряжений видоизменяется, деформирование среды приобретает качественно и количественно другой

характер. При деформировании образца блочного массива наблюдается дилатансионный эффект (рисунок 11), что значительно влияет на напряженно-деформированное состояние (НДС) массива и явно наблюдается на запредельной стадии деформирования, где образец блочного массива может разрушаться и хрупко, и пластически в зависимости от строения. Деформация образцов блочного массива сопровождается существенной перестройкой его структуры за счет трансляционного скольжения по границам контактов практически без достижения предельных значений напряжений внутри образующих блоков. Процесс развития деформаций блочного массива происходит по пути наименьшего сопротивления, в то время как накопление напряжения происходит в локальных зонах, где сдвиг невозможен до момента достижения предельных деформаций сдвига. Так основные деформации в блочном массиве происходят по направлениям нарушений сплошности (рисунок 11).

Количественно выявленный масштабный эффект (рисунок 12) прочности массива обусловлен отсутствием подобия между массивами различных габаритов: при увеличении размера массива в расчетную область включается большее количество трещин (рисунок 7), что приводит к увеличению неоднородности распределения напряжений и деформаций внутри массива (рисунки 13, 14). Трещины разрыва развиваются преимущественно вдоль направления действия максимального главного напряжения - по мере увеличения объема массива образование последних происходит легче, так как жесткость структуры уменьшается за счет возникновения более сложного строения при включении в массив большего количества трещин. Процесс деформирования, заключающийся в развитии трещиноватости и относительного смещения образующих блоков происходит по линиям наименьшего сопротивления, определение которых происходит сложным интегрированным напряженным состоянием массива (рисунки 13, 14). Возникновение трещин отрыва и их развитие вместе с трещинами сдвига приводит к возникновению характерного для конкретной задачи НДС, а приложение боковых нагрузок обуславливает усложнение этого процесса, что выражается в увеличении прочности массива (рисунки 9, 10).

Предлагаемый метод позволяет вычислять напряженно-деформированное состояние массива, обладающего блочной структурой с учетом в явной форме строения и контактных условий между блоками горной породы. Трещины являются причиной пространственной изменчивости механических характеристик массива, что является причиной неоднородного распределения напряжений в массиве.

По результатам исследования рекомендуется оценивать механические характеристики отдельных участков массива, междукамерных целиков, обладающих структурными особенностями с помощью разработанной численной геомеханической модели.

3. Для выбора геомеханически безопасных параметров междукамерных целиков в блочном рудном массиве необходимо использовать разработанную методику прогноза их геомеханического состояния, позволяющую учитывать их строение и размеры, анизотропию и масштабный эффект механических характеристик.

При использовании предлагаемой методики массив рассматривается как дискретная среда. Когда нагрузка прикладывается к целикам, напряжения на контакте между блоками породы увеличиваются, что приводит к их деформированию, развитию трещин сдвига, возникновению трещин разрыва. Если напряжения превышают предельное значение, связи между блоками нарушаются, а у самих блоков появляется возможность перемещаться относительно друг друга, что вызывает развитие деформаций. Методика выбора геомеханически безопасных параметров междукамерных целиков в блочном рудном массиве включает в себе следующие основные этапы: построение геометрической модели рудного массива с учетом трещиноватости в явном виде, создание геомеханической модели, учитывающей механические характеристики блоков горной породы и контактные условия, выбор расчетной схемы, проведение ряда численных экспериментов для вычисления наиболее неблагоприятных пространственных расположений трещиноватости с точки зрения прочности целика, проведение численных экспериментов с варьированием размеров сторон целика для построения зависимости прочности от соотношения сторон, выбор наиболее безопасных па-

раметров. Особое внимание должно быть уделено выбору структурного строения массива и условий на контактах.

Методика позволяет учитывать влияние трещиноватости массива, ее определение сопровождается геотехническими неопределённостями, вызванными большим разнообразием геомеханических и геометрических показателей трещиноватости.

Зависимость изменения прочностных показателей образцов от отношения высоты к ширине призматического или цилиндрического образца обычно вводят в эмпирические формулы расчета целиков по предельным напряжениям в виде коэффициента формы, результатом чего является линейная зависимость прочности целика от соотношения его сторон, что не соответствует результатам численных экспериментов и натуральных наблюдений (рисунок 15). Предположения о равномерном распределении напряжений и об отсутствии касательных напряжений, положенные в основу расчетной схемы не оправдываются, исходя из этого, применяемая эмпирическая зависимость для расчета прочности целиков может давать некорректные результаты.

Характер распределений напряжений в целике показывает, что его несущая способность используется не полностью. Уменьшение сдвигающих напряжений и концентрации напряжений в целиках можно достигнуть путем увеличения его ширины относительно высоты (рисунок 16). Учет системы трещиноватости в целике позволяет получить результаты, свидетельствующие о несимметричности распределения внутри целика, зона наиболее нагруженных частей целика варьируется в зависимости от структуры массива. Таким образом выявлены зоны, где разница между нагруженными и незагруженными участками велика и тогда, прочность целика значительно снижается относительной прочностью, образующей целик руды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в диссертации исследования посвящены разработке методики вычисления механических характеристик блочного горного массива, их анизотропии и масштабного эффекта, несущей способности целиков в блочном рудном массиве с учетом трещиноватости массива. Основные результаты выполненных исследований:

1. Численная геомеханическая модель блочного горного массива, представленного дискретной средой, учитывает контактные условия между блоками, строение блочного массива в явном виде, позволяет моделировать формирование и развитие трещин сдвига и разрыва, получать зависимость напряжений от деформаций блочного массива, где деформационная анизотропия учитывается в явном виде в процессе разрушения блочной структуры массива.

2. Выполненные численные эксперименты позволили вычислить механические показатели блочного горного массива, их анизотропию и масштабный эффект. По результатам численных экспериментов возможно выявление закономерностей изменения деформационных характеристик блочного массива в зависимости от достигаемых напряжений.

3. Разработанная численная геомеханическая модель блочного горного массива позволяет производить оценку влияния трещиноватости в блочном горном массиве на его механические характеристики.

4. По результатам численных экспериментов выявлена степень влияния ориентации трещиноватости блочного горного массива на его механические характеристики – при прочих равных граничных условиях, вариация может достигать неоднократной разницы, учет чего имеет практическое важное значение для обеспечения безопасных условий эксплуатации подземных сооружений.

5. Выявлены причины возникновения вариации механических характеристик блочного рудного массива при увеличении рассматриваемого его объема, выражающиеся в изменении характера распределения напряжений внутри массива при деформировании, в соответствии с этой причиной формируется масштабный эффект, который может быть выражен через изменение коэффициента структурного ослабления по мере увеличения размеров массива.

6. При вычислении прочности междукамерных целиков численная модель позволяет в явном виде определять зоны возникновения площадок сдвига, характер распределения напряжений внутри целика, в модели отображаются деформации каждого компонента системы. Детализированная геомеханическая модель междукамерных целиков позволяет подробно рассматривать его процесс деформирования и формирования предельного состояния для проектирования с повышенными требованиями безопасности в сложных горно-геологических условиях.

7. Выявлены нелинейные закономерности изменения прочности междукамерного целика в блочном горном массиве при вариации соотношения сторон последнего и при этом разрушение блочного массива может быть описано и упруго-пластической и жестко-пластической моделями прочности в зависимости от его строения.

8. Использование разработанной методики прогноза напряженно-деформированного состояния блочного массива позволяет вычислять геомеханически безопасные параметры междукамерных целиков, учитывать при проектировании системы разработки рудных месторождений на глобальных моделях механические характеристики репрезентативного элементарного объема блочного горного массива.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. **Протосеня, А.Г.** Определение масштабного эффекта прочностных свойств трещиноватого горного массива / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Серия: Науки о земле. Известия Тульского государственного университета. – 2016. – № 1. – С. 167-177.

2. **Протосеня, А.Г.** Оценка прочности блочного горного массива методом численного моделирования / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 1. – С. 47-55.

3. **Протосеня, А.Г.** Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Записки Горного института. – 2017. – № 223. – С. 51-58.

В прочих изданиях:

4. **Вербилло, П.Э.** Моделирование трещиноватого горного массива / П.Э. Вербилло // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Международная научная школа молодых ученых. Сборник тезисов. Москва. – 2015. – С. 46-49.

5. **Вербилло, П.Э.** Численное моделирование блочного горного массива при различных схемах нагрузки / П.Э. Вербилло // Научный журнал «Процессы в геосредах». Москва. – 2015. – № 4(4). – С. 5-11.

6. **Вербилло, П.Э.** Моделирование трещиноватого горного массива / П.Э. Вербилло // Проблемы недропользования: международный форум-конкурс молодых ученых. Сборник научных трудов. Часть II. Санкт-Петербург. – 2016. – С. 200.

7. **Протосеня, А.Г.** Расчет несущей способности и изучение анизотропии прочностных характеристик междукамерных целиков в блочном горном массиве / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Сборник трудов конференции инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Санкт-Петербург. – 2017. – С. 219-225.

8. **Протосеня, А.Г.** Прочность целиков в блочном горном массиве / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и

подземного пространства мегаполисов. Санкт-Петербург. – 2017. – С. 44-45.

9. **Вербило, П.Э.** Численное моделирование блочного рудного массива / П.Э. Вербило // Проблемы недропользования: международный форум-конкурс молодых ученых. Сборник научных трудов. Часть I. Санкт-Петербург. – 2018. – С. 96-98.

В иностранных изданиях:

10. **Protosenya, A.G.** Forecast Jointed Rock Mass Compressive Strength Using a Numerical Model [Электронный ресурс] / A.G. Protosenya, P.E. Verbilo // Advanced Materials and Technologies for Energy Efficiency and Sustainable Development. MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 7. – Режим доступа: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2016/36/mateconf_tpacee2016_04006/mateconf_tpacee2016_04006.html.

11. **Verbilo, P.E.** Numerical investigation of the scale effect and REV of jointed rock masses to conditions of apatite-nepheline ore «Plateau Rasvumchorr» JSC «Apatit» / P.E. Verbilo // Scientific Reports on Resource Issues. Freiberg. – 2016. – Vol. 1. – P. 117-124.

12. **Trushko, V.L.** Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite-nephelinic ores / V.L. Trushko, A.G. Protosenya, P.E. Verbilo // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13 (8). – P. 2864-2872.

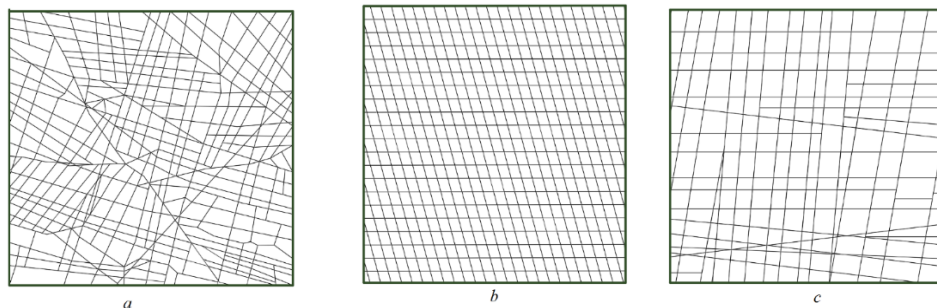


Рисунок 1 – Геометрические модели блочного массива с тремя видами структурной нарушенности (*a* – хаотичная, *b*- упорядоченная, *c* – хаотично-упорядоченная).

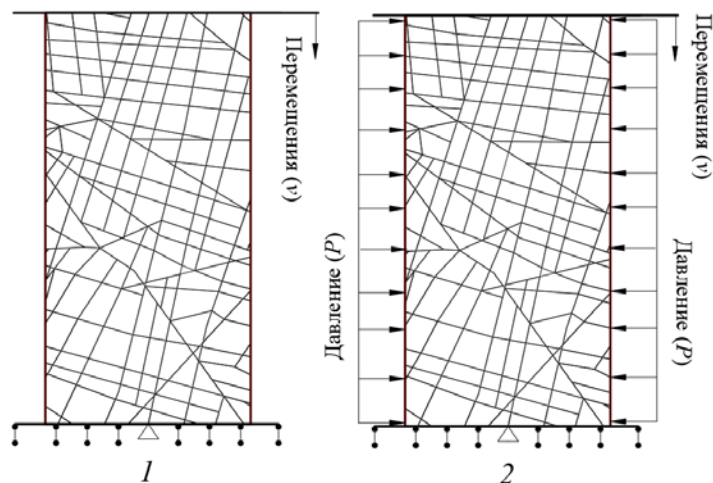


Рисунок 2 – Схемы приложения нагрузок к модели при численном эксперименте: 1 - схема испытания на одноосное сжатие; 2 - схема испытания на двухосное сжатие.

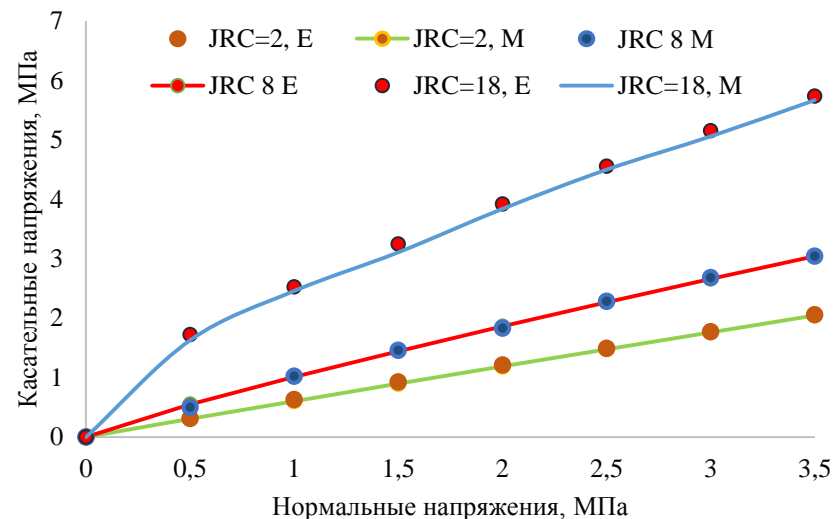


Рисунок 3 – Паспорт прочности взаимодействия по контакту блоков горной породы (руды) при показателях *JRC* равных 2, 8, 18 для аналитического решения (*E*) и численного моделирования (*M*).

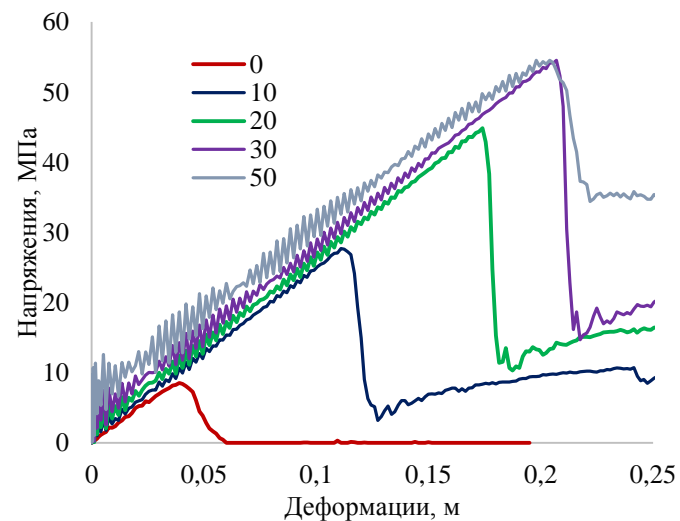


Рисунок 4 – Графики зависимостей напряжений от деформаций горного массива с углом наклона упорядоченной трещиноватости 90° к горизонтальной плоскости при различных величинах бокового давления (0, 10, 20, 30, 50 МПа).

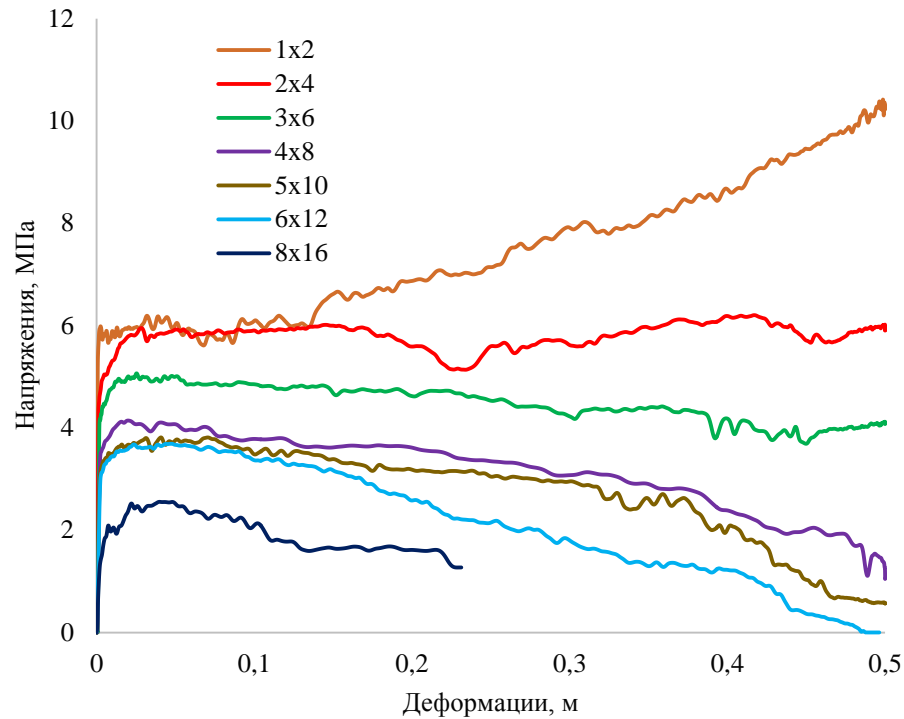


Рисунок 5 – Графики деформирования блочного массива различных размеров с соотношением сторон 1:2 с хаотичной трещиноватостью (рис. 1, а) при изучении масштабного эффекта.

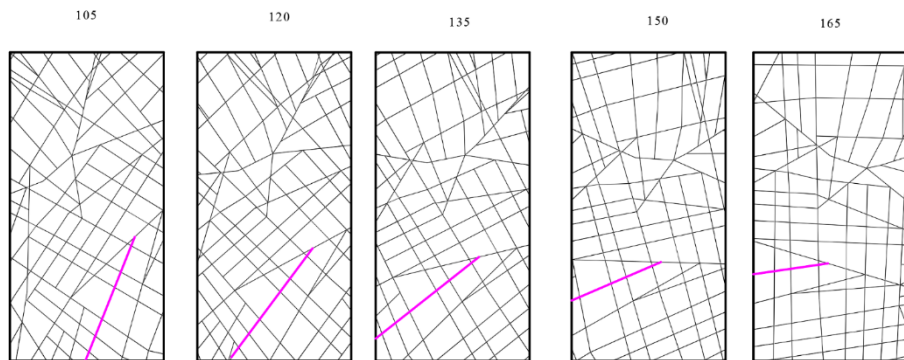


Рисунок 6 – Схемы трещиноватости для различных углов (105°, 120°, 135°, 150°, 165°) наклона системы хаотичной системы трещиноватости (рис. 1, а).

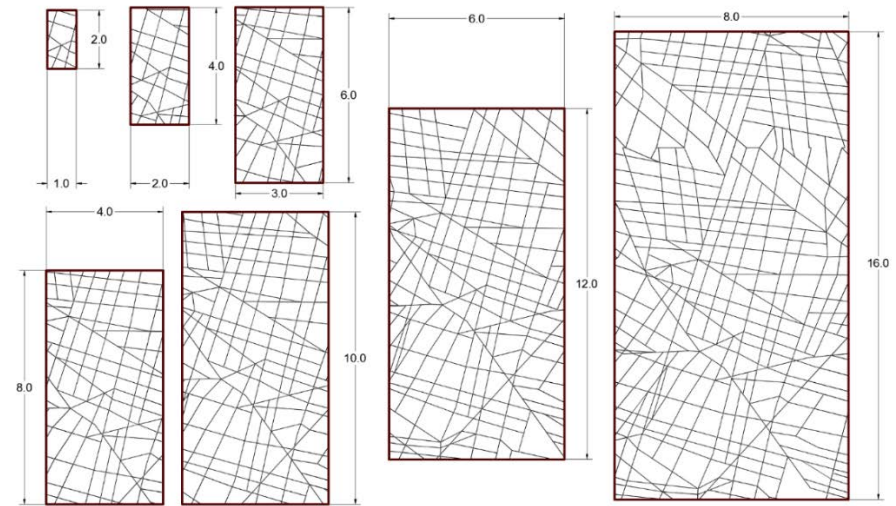


Рисунок 7 – Построение моделей блочного массива с хаотичной системой трещиноватости (рис. 1, а) с соотношением сторон 1:2 и размерами 1×2 м, 2×4 м, 3×6 м, 4×8 м, 5×10 м, 6×12 м, 7×14 м, 8×16 м.

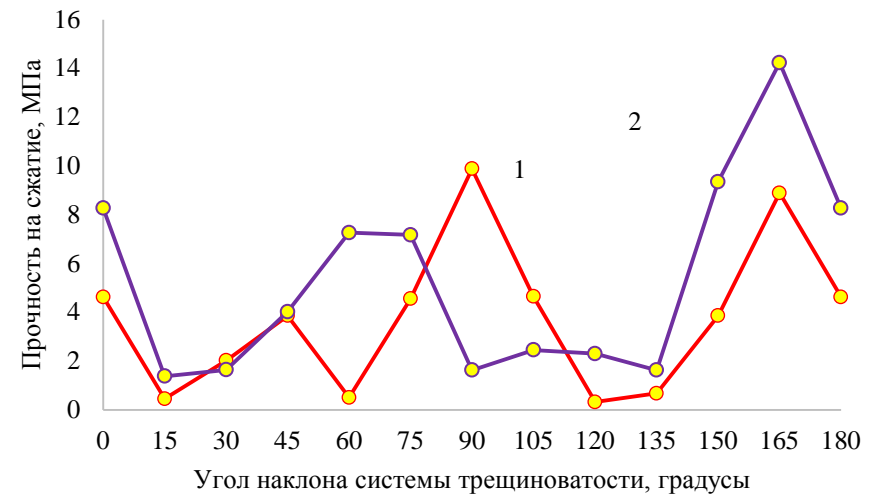


Рисунок 8 – Анизотропия прочности на сжатие целлика в блочном рудном массиве, где 1-блочный массив с упорядоченной системой, 2 - блочный массив с хаотичной системой трещиноватости.

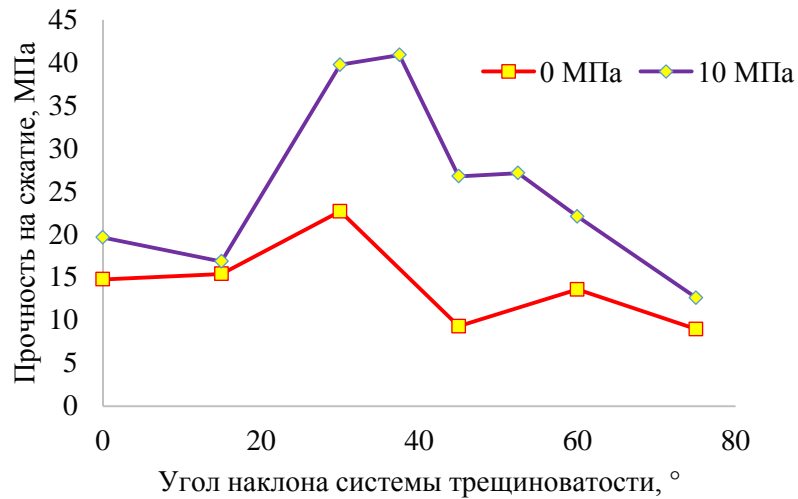


Рисунок 9 – Анизотропия прочности на сжатие блочного рудного массива с хаотично-упорядоченной системой трещиноватости (рис. 1, *c*) с размерами сторон 2 м при отсутствии бокового давления и с боковым давлением 10 МПа.

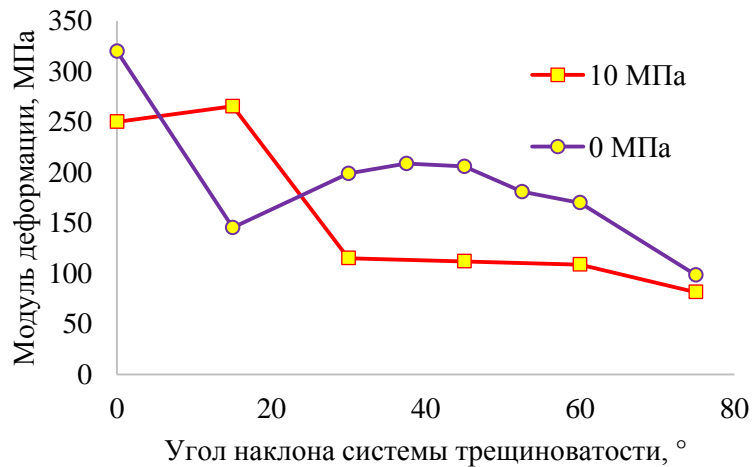


Рисунок 10 – Анизотропия модуля деформации блочного рудного массива с хаотично-упорядоченной системой трещиноватости (рис. 1, *c*) с размерами сторон 2 м при отсутствии бокового давления и с боковым давлением 10 МПа.

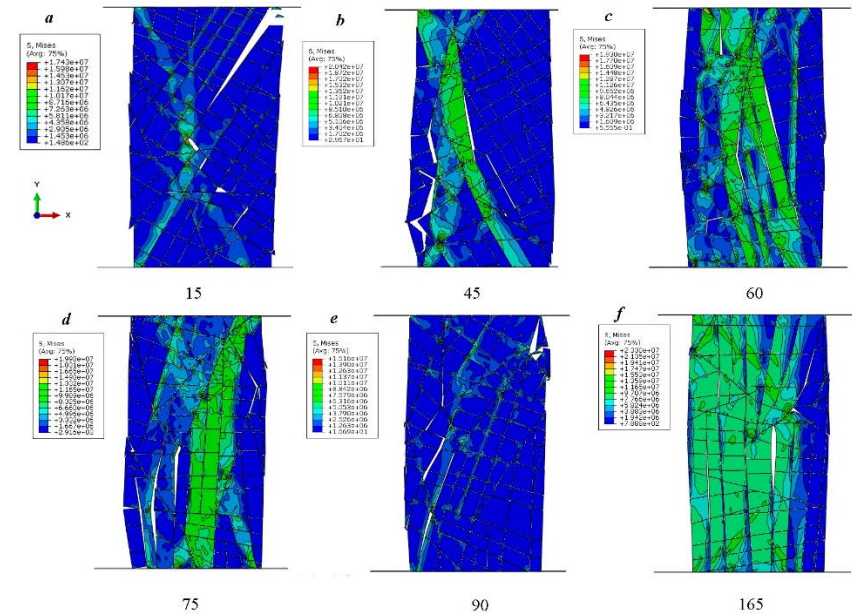


Рисунок 11 – Предельные состояния блочного массива с хаотичной системой трещиноватости и углами её наклона *a*-15°, *b*-45°, *c*-60°, *d*-75°, *e*-90°, *f*-165°.

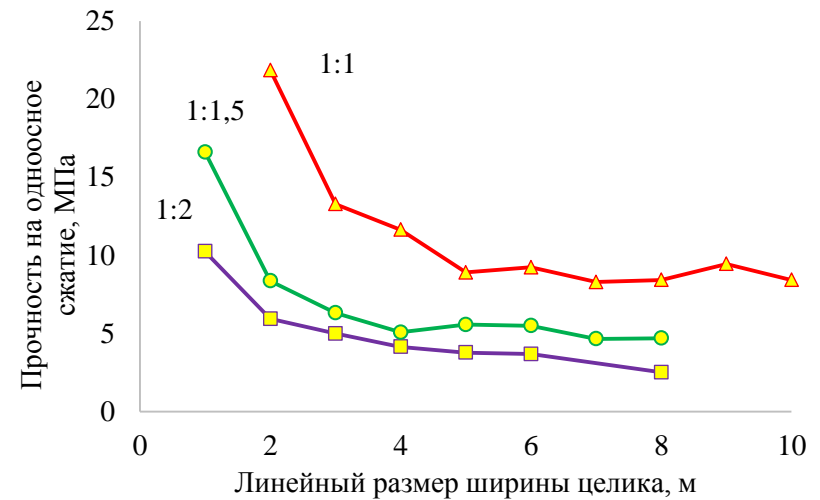


Рисунок 12 – Масштабный эффект прочности на сжатие блочного рудного массива с хаотичной системой трещиноватости (рис. 1, *a*) при различных соотношениях его сторон (1:1, 1:1.5, 1:2).

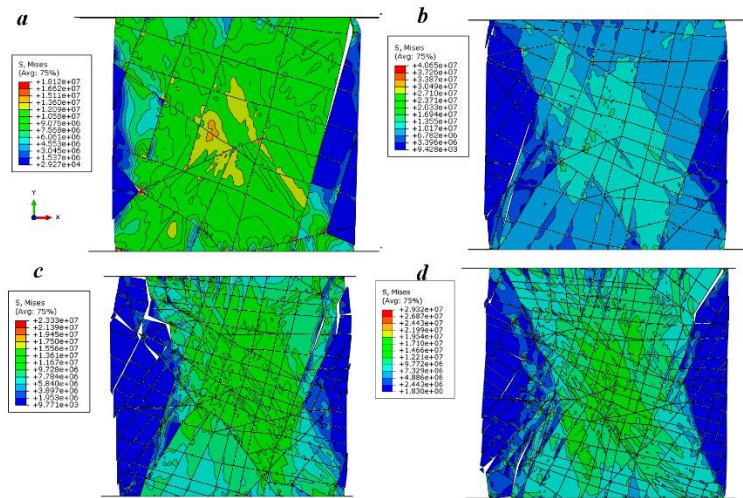


Рисунок 13 – Предельные состояния целиков в блочном рудном массиве с хаотичной системой трещиноватости при соотношении сторон целика 1:1 с разными размерами: *a*- 3×3 м, *b*- 6×6 м, *c*- 8×8 м, *d*- 10×10 м.

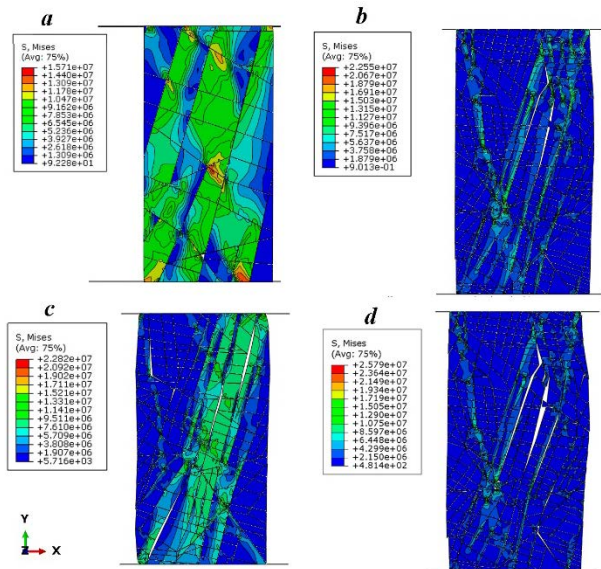


Рисунок 14 – Предельные состояния целиков в блочном рудном массиве с упорядоченной системой трещиноватости при соотношении сторон целика 1:1 с разными размерами: *a*- 2×4 м, *b*- 4×8 м, *c*- 6×12 м, *d*- 8×16 м.

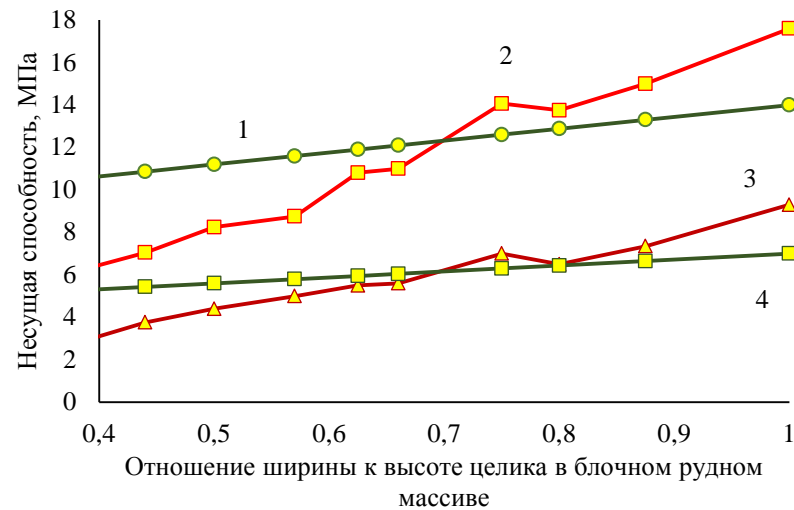


Рисунок 15 – Изменение прочности целика в блочном рудном массиве с упорядоченной системой трещиноватости (рис. 1, *b*) при варьировании соотношения его сторон при использовании эмпирической методики ВНИМИ (1,3) и численного моделирования (2,4) для частот трещиноватости: 4 тр./пог. м (1,2) и 4-10 тр./пог. м (3,4).

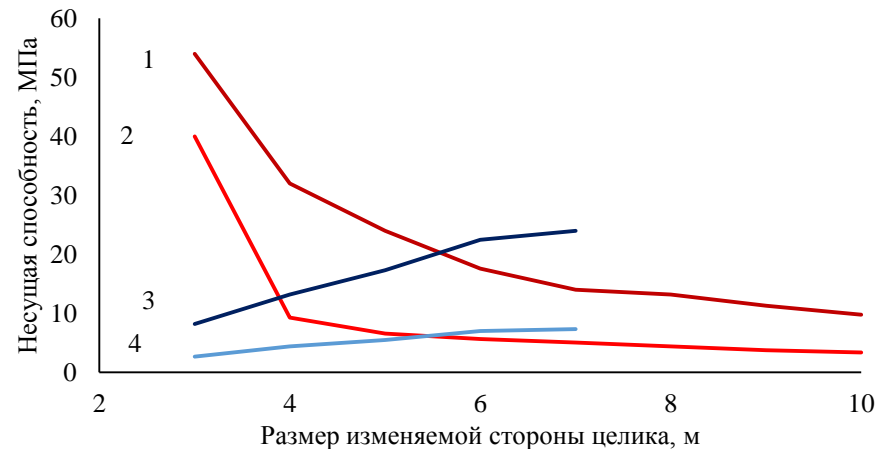


Рисунок 16 – Изменение прочности целика в блочном рудном массиве с упорядоченной системой трещиноватости варьировании размеров ширины с постоянной высотой (3,4) и при варьировании высоты при постоянной ширине (1,2) для частот трещиноватости: 4 тр./пог. м (1,3) и 4-10 тр./пог. м (2,4).