

На правах рукописи

Селихов Александр Александрович



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА ИЗ
ОТХОДОВ СОЛЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Карасев Максим Анатольевич

Официальные оппоненты:

Ашихмин Сергей Геннадьевич

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Маркшейдерское дело, геодезия и геоинформационные системы», профессор;

Куранов Антон Дмитриевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью "Институт Гипронибель", директор по проектированию технологических дисциплин.

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

Защита диссертации состоится **20 мая 2026 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

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

Автореферат разослан 20 марта 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ

Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Разработка калийных месторождений в условиях больших глубин требует применения эффективных методов управления горным давлением, например таких как использование систем разработки с закладкой выработанного пространства. В таких условиях закладка выработанного пространства является ключевым подходом к обеспечению безопасной эксплуатации рудников. Эффективность подхода напрямую зависит от способности закладочного массива воспринимать нагрузку и снижать напряжения в междукамерных целиках, предотвращая их разрушение, что благоприятно сказывается на геомеханической безопасности разработки месторождений калийных солей.

В этой связи повышаются требования к достоверности прогноза напряженно-деформированного состояния (далее «НДС») целиков за счет включения в совместную работу закладочного материала на основе раздробленных соляных пород или солеотходов с добавлением цемента, модель деформирования которых должна учитывать ключевые механизмы поведения – уплотнение, упрочнение, дилатансию и нелинейный характер сдвигового разрушения, что обуславливает актуальность исследования.

Степень разработанности темы исследования

Фундаментальные основы в области разработки месторождений калийных солей, механики деформирования и разрушения соляных пород и оценки устойчивости междукамерных целиков внесли А.А. Барях, В.П. Зубов, А.Г. Протосеня, А.Н. Ставрогин, А.О. Ермашов, В.А. Асанов, И.А. Санфиоров, Ю.А. Кашников, Е.Р. Ковальский и др. Вопросами формирования и свойств закладочных массивов на основе отходов калийного производства занимались С.А. Константинова, М.В. Гилев, К.В. Громцев, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, М.М. Хайрутдинов.

Исследования механики раздробленных соляных пород в международной практике рассмотрены в работах G.D. Callahan, F.D. Hansen, L. Blanco-Martín и др. разработаны термо-гидро-механические модели, описывающие уплотнение и длительную ползучесть

измельченной соли. Моделированию сыпучих и слабосцементированных геоматериалов с использованием подходов механики сплошной среды, посвящены труды S. Olivella, A. Gens, P.A. Vermeer и др.

Несмотря на значительный объем проведенных научных исследований, большинство существующих моделей деформирования закладочного материала либо сводят механический отклик к линейно-упругому или идеально-пластическому, либо, разработаны для специфических термомеханических условий, не характерных для калийных месторождений, и требуют определения параметров, получаемых с использованием дорогостоящего оборудования по программам лабораторных испытаний отклоняющихся от общепринятых в инженерной практике. Сохраняется научный пробел в области комплексного экспериментального исследования и моделирования механического поведения закладочных материалов из отходов соляной промышленности при сложных траекториях нагружения, характерных для их работы в массиве. Отсутствует единая методология калибровки и верификации современных упругопластических моделей шатрового класса с упрочнением применительно к данному классу геоматериалов.

Объект исследований – закладочные массивы, формируемые из отходов соляной промышленности.

Предмет исследований – деформирование и разрушение закладочных массивов при совместном взаимодействии с породами междукамерного целика.

Цель работы – обоснование модели деформирования закладочного массива и повышение достоверности прогноза НДС междукамерных целиков и закладочного массива при их совместном взаимодействии.

Идея работы – достоверность прогноза НДС междукамерных целиков при совместном взаимодействии с закладочным массивом достигается за счет совершенствования шатровых моделей деформирования геоматериалов в части выбора поверхностей пластического течения и потенциала, а также обоснования параметров пластического упрочнения по результатам комплексных лабораторных исследований раздробленных и сцементированных соляных пород.

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

1. Анализ существующих подходов к моделированию закладочных массивов, выявление их ограничений и обоснование выбора современных моделей деформирования для детального исследования.

2. Разработка программы и проведение комплекса лабораторных исследований механического отклика раздробленных соляных пород и сцементированных солеотходов при различных траекториях нагружения.

3. Установление моделей деформирования закладочных массивов по результатам экспериментальных исследований: вид и параметры поверхностей пластического течения и пластического потенциала, закона упрочнения.

4. Адаптация моделей деформирования геоматериалов для прогноза их НДС при выполнении численного моделирования.

5. Верификация параметров геомеханических моделей деформирования закладочных материалов на основе данных лабораторных исследований.

6. Разработка методики прогноза НДС междукамерных целиков и закладочного массива при их совместном взаимодействии при различной степени заполнения камер с применением ранее верифицированных моделей закладочных материалов и вмещающих пород.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально установлено, что деформирование закладочного материала на основе раздробленных соляных пород описывается неассоциированным законом пластического течения в сдвиговой части поверхности текучести, что в классических моделях не учитывается и приводит к некорректному описанию объемных пластических деформаций и дилатансии.

2. Выявлен механизм изменения формы поверхности пластического течения при наличии в закладочном массиве цементационных связей, что позволило создать модель, описывающую переход от фрикционного поведения к когезионно-фрикционному, что повысило точность прогноза НДС твердеющих закладочных материалов.

3. Установлена логарифмическая зависимость угла внутреннего трения от уровня средних напряжений, что позволило повысить

достоверность прогноза сдвиговой прочности материала при различных уровнях всестороннего обжатия, устранив погрешность, свойственную моделям с постоянными углом внутреннего трения.

4. Предложен новый закон пластического упрочнения, описывающий эволюцию предела текучести при объемном сжатии, который, в отличие от стандартных линейных аппроксимаций, позволяет учитывать нелинейный характер уплотнения и набора прочности материала, что обеспечило повышение достоверности прогноза НДС складочного массива.

Соответствие паспорту специальности

Содержание работы соответствует паспорту научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по п.п. 1, 3, 5, 6, а именно:

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.

3. Изменения свойств горных пород и грунтов в образцах и в естественных условиях в массиве в результате воздействия механических, тепловых, электромагнитных, физико-химических и других полей.

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.

6. Теоретические основы прогнозирования геомеханических процессов в массивах горных пород и грунтов, в том числе антропогенных, служащих средой и материалом различных горнотехнических конструкций.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Экспериментально обосновано применение неассоциированного закона пластического течения для раздробленных соляных пород и количественно определены его параметры.

2. Получены уравнения механического поведения раздробленных соляных пород, связывающие приращение деформаций и напряжений – закон пластического упрочнения, математически описывающий изменения положения поверхности пластического течения от накопленных пластических объемных деформаций.

3. Уточнено теоретическое представление о механизме разрушения закладочных материалов, описывающие переход от фрикционного поведения к когезионно-фрикционному при наличии цементационных связей.

4. Разработана и верифицирована геомеханическая модель системы и методика ее калибровки для количественной оценки НДС пород междукамерного целика и закладочного массива.

5. Получены параметры моделей деформирования шатрового класса с упрочнением для закладочных материалов на основе раздробленных соляных пород и солеотходов с добавлением цемента, применение которых более точно воспроизводит их механическое поведение в сравнении с классической упругой модели или моделью Кулона-Мора.

6. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию при ведении проектной и экспертной работы в деятельности ООО «СПБ-Гипрошахт» при разработке технико-коммерческих предложений в части сопровождения проектирования закладочных работ. Акт о внедрении от 18 апреля 2025 г., утвержден директором по проектированию горных работ Д.В. Климовым.

Методология и методы исследования

Методологическую основу исследования составляет комплексный подход, включающий теоретический анализ существующих геомеханических моделей деформирования закладочных материалов, проведение серии лабораторных экспериментов, включая испытания на гидростатическое и трехосное сжатие по модифицированной и классической схемам Кармана, статистическую обработку и регрессионный анализ экспериментальных данных для определения параметров и вывода конститутивных зависимостей – законов упрочнения и пластического течения, а также численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе для

верификации разработанных моделей и последующего решения прикладной задачи по оценке НДС пород междукамерного целика и закладочного массива с выводом практических рекомендаций для инженерных расчетов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Механическое поведение закладочного материала, представленного раздробленными соляными породами, описывается нелинейной поверхностью пластического течения, наклон которой в меридиональной плоскости уменьшается по логарифмическому закону с ростом средних напряжений, стремящейся к константе при достижении высоких уровней всестороннего обжатия, а в области нормального уплотнения представляет шатровую поверхность, описываемую ассоциированным законом пластического течения.

2. Образование цементационных связей при формировании твердеющего закладочного материала из солеотходов и цемента изменяет характер его деформирования, который при малых величинах обжатия ведет себя как хрупкий, а при величинах обжатия сопоставимых со структурной прочностью как пластический материал, механическое поведение которого в целом может быть описано в рамках теории пластичности единой поверхностью пластического течения ассиметричной замкнутой выпуклой формы.

3. Механизм формирования отпора закладочного массива деформациям породного целика определяется в зависимости от степени заполнения камеры, так, при ее заполнении до 80% определяющую роль играет сдвиговая прочность материала, а при более полном заполнении доминирующим становится его сопротивление объемному сжатию.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается корректной постановкой цели и задач диссертационной работы, проведением экспериментальных исследований, применением комплексного подхода, сочетающего экспериментальную проверку, использование признанных методов, теоретическую согласованность с общепризнанными теоретическими положениями.

Апробация результатов. Основные вопросы, рассмотренные в диссертационной работе, были освещены на следующих конферен-

циях: XI форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства, 12-16 декабря 2022 г., Минск; XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» 29 мая - 01 июня 2024 г., Санкт-Петербург; XII Международный научно-практический форум «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», 27-31 мая 2025 г., Санкт-Петербург; XVIII Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки в современном мире», 20 июля 2025 г., Уфа.

Личный вклад автора: автором были поставлены цели и задачи диссертации, проанализированы отечественные и зарубежные научные труды по тематике исследования, разработаны методические подходы к проведению комплексных лабораторных испытаний и адаптации моделей деформирования закладочных материалов. Также обосновано применение моделей с упрочнением для описания нелинейного деформирования раздробленных соляных пород, сформирован подход к численному моделированию как лабораторных экспериментов для верификации модели материала, так и полномасштабной задачи на уровне междокамерного целика при взаимодействии с закладочным массивом. Получены закономерности, определяющие влияние уровня напряжений и наличия цементационных связей на прочностные и деформационные свойства закладочных материалов, включая вид поверхности пластического течения, закон упрочнения и характер пластического течения. Сформированы практические рекомендации по применению разработанных моделей для оценки влияния полноты заполнения выработки и свойств закладочного материала на НДС междокамерных целиков.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 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 международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура диссертации. Диссертационная работа содержит в себе следующие структурные элементы: оглавление, введение, 4 главы с выводами по каждой, а также заключения и списка литературы, который включает в себя 109 наименований. Работа изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 111 рисунков и 30 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ степени изученности проблемы моделирования закладочных массивов. Выявлены ограничения классических моделей, заключающиеся в невозможности адекватно описывать ключевые механизмы поведения сыпучих и слабощементированных материалов: уплотнение, упрочнение, дилатансию и нелинейный характер деформирования. На основе проведенного анализа обоснована необходимость применения современных упругопластических моделей с упрочнением, таких как Cap Plasticity и Soft-Rock Plasticity, и сформулированы задачи научного исследования.

Во второй главе представлена методика и результаты комплексного лабораторного исследования механических свойств закладочных материалов. Описана программа испытаний, включающая гидростатическое и трехосное сжатие по модифицированной и классической схемам Кармана. Представлены экспериментальные данные для двух типов закладочных материалов: раздробленных соляных пород и солеотходов с добавлением цемента. По результатам испытаний установлены фундаментальные закономерности их поведения: определены прочностные и деформационные характеристики, доказан неассоциированный характер пластического течения через количественное определение углов внутреннего трения и дилатансии, получены данные для калибровки законов упрочнения.

В третьей главе сформулированы теоретические положения и методологический подход к численному моделированию механического поведения исследуемых материалов. Разработана методика адаптации и верификации параметров упругопластических моделей Cap Plasticity и Soft Rock Plasticity на основе данных, полученных во второй главе. Выведен закон пластического упрочнения, связывающее эволюцию предела текучести с накопленными пластическими деформациями. Выполнена верификация разработанных моделей путем численного моделирования лабораторных испытаний в программном комплексе, которая показала высокую степень сходимости расчетных и экспериментальных результатов, подтвердив адекватность моделей.

В четвертой главе решена прикладная задача по оценке характера деформирования системы «междукамерный целик – закладочный массив». На основе верифицированных моделей поведения закладочного массива выполнено численное моделирование для оценки влияния степени заполнения выработки и свойств закладочного материала (сыпучего и цементированного) на НДС целиков. По результатам численных экспериментов установлен и количественно описан механизм поддерживающего влияния закладочного массива, показана его зависимость от степени заполнения камеры.

В заключении сформулированы основные результаты проведенного исследования, а также направления дальнейших исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Механическое поведение закладочного материала, представленного раздробленными соляными породами, описывается нелинейной поверхностью пластического течения, наклон которой в меридиональной плоскости уменьшается по логарифмическому закону с ростом средних напряжений, стремящейся к константе при достижении высоких уровней всестороннего обжатия, а в области нормального уплотнения представляет шатровую поверхность, описываемую ассоциированным законом пластического течения.

Для установления особенностей формы поверхности пластического течения закладочного массива из раздробленных соляных пород выполнены лабораторные испытания в условиях гидростатического сжатия, классической схемы Кармана, модифицированной схемы Кармана, при которой с ростом девиаторных напряжений сохранялось постоянное значение средних напряжений, а также объемного сжатия с постоянным соотношением максимального и минимального главных нормальных напряжений. Обобщение результатов лабораторных исследований позволило установить, что для математического описания процессов деформирования закладочного материала возможно применение шатрового класса моделей (Cap и Soft Rock Plasticity), форма поверхности пластического течения и законы пластического упрочнения которых адаптированы с учетом особенностей деформирования закладочного материала.

Среднее значение величины достоверности аппроксимации R^2 в процессе верификации обеих моделей при воспроизведении испытаний по модифицированной схеме Кармана составляет 0,94.

Установлена зависимость угла внутреннего трения β от средних напряжений p , в общем виде описываемая уравнением (1):

$$\beta = A \ln(p) + B, \quad (1)$$

где A и B коэффициенты, значения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты моделей Cap и Soft Rock Plasticity

Коэффициент	Модель Cap	Модель Soft Rock
A	-3,1	-1,47
B	72,47	76,45

Закон пластического упрочнения может быть выражен как функция от относительных объемных пластических деформаций (2):

$$p = D \varepsilon_{vol}^{pl\ 2} + E \varepsilon_{vol}^{pl} + F, \quad (2)$$

где ε_{vol}^{pl} – относительные объемные пластические деформации; D , E и F – коэффициенты, значения которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты закона упрочнения

Коэффициент	D	E	F
Значения	197,18	13,05	0,41

Форма поверхности пластического течения, установленная по результатам лабораторных испытаний, а также направление развития

векторов пластических деформаций, в зависимости от траектории нагружения, представлены на рисунке 1.

Векторы развития пластических деформаций в сдвиговой части поверхности пластического течения совпадают с направлением оси q и не направлены по нормали к поверхности, что позволяет говорить о неассоциированном пластическом течении.

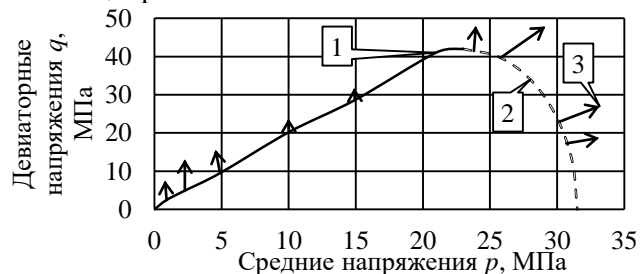


Рисунок 1 – Поверхность пластического течения: 1 – сдвиговая часть; 2 – шатровая часть; 3 – векторы, показывающие направление развития пластических деформаций

В то же время, в шатровой части поверхности пластического течения векторы пластических деформаций ортогональны к поверхности пластического течения, что позволяет говорить об ассоциированном законе пластического течения.

2. Образование цементационных связей при формировании твердеющего закладочного материала из солеотходов и цемента изменяет характер его деформирования, который при малых величинах обжатия ведет себя как хрупкий, а при величинах обжатия сопоставимых со структурной прочностью как пластический материал, механическое поведение которого в целом может быть описано в рамках теории пластичности единой поверхностью пластического течения ассиметричной замкнутой выпуклой формы.

Обобщение экспериментальных исследований, полученных при испытании в лабораторных условиях образцов с 5%, 10% и 25% содержанием цемента по массе образца, позволили установить форму поверхности пластического течения в меридиональной плоскости. Эта поверхность имеет характерную ассиметричную замкнутую выпуклую форму, объединяющую сдвиговую, переходную и шатровую

части. Пример такой поверхности для 5% содержания цемента представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Поверхность пластического течения: 1 – 4 – траектории нагружения (0; 4; 8 и 12 МПа); 5 – контур поверхности пластического течения; 6 – граница зоны упругих деформаций; 7 – 9 – границы зон значений относительных объемных пластических деформаций соответственно равных 0,0075, 0,01 и 0,015

При увеличении содержания цемента в составе закладочного материала происходит снижение угла внутреннего трения, увеличение сцепления и прочности при растяжении, а также смещение начального положения шатровой составляющей поверхности пластического течения. Для теоретического описания этого явления была предложена модификация геомеханической модели Soft Rock Plasticity, стандартное уравнение которой описывается формулой (3):

$$f_{sr} = \sqrt{(e_0 p_c \tan \beta)^2 + q^2} - (p - p_t) \tan \beta \left(\frac{p - p_c}{p_t - p_c} \right)^{\frac{1}{n_y}} - e_0 p_c \tan \beta = 0 \quad (3)$$

где p – среднее напряжение; q – девиатор напряжений; p_c и p_t – давление предуплотнения, которое соответствует максимальному и минимальному среднему напряжению, которое испытывал материал, и контролирует положение поверхности пластического течения; β – угол внутреннего трения в девиаторной плоскости; n_y – параметр формы, отвечающий за кривизну вершины поверхности текучести; e_0 – начальный параметр, связанный со сцеплением материала, который влияет на начальный наклон и общую высоту поверхности текучести.

Анализ данных лабораторных исследований позволил установить связь между содержанием цемента в закладочном материале и параметров p_c , p_t , β и n_y . Переменные параметры определяются законом, общий вид которого описывается формулой (4):

$$V^c = V \left(1 + k \left(\frac{C}{100} \right)^\alpha \right), \quad (4)$$

где V^c – новый переменный параметр; V – базовый параметр (значение параметра без учета цементационных связей); k и α – поправочные коэффициенты; C – процентное содержание цемента марки М500. Коэффициент k линейно определяет степень влияния добавки цемента, положительное значение увеличивает целевой параметр, отрицательное – уменьшает. Коэффициент α отражает нелинейность влияния цемента.

Базовые значения параметров модели сведены в таблице 3, а значения поправочных коэффициентов в таблице 4.

Таблица 3 – Базовые параметры для закладочного материала на основе раздробленных соляных пород

Параметр	$\beta, ^\circ$	n_y	$p_c, \text{МПа}$	$p_t, \text{МПа}$	e_0
Значение	71	2,5	0,75	0,1	0,001

Таблица 4 – Поправочные коэффициенты

Параметр	p_c		p_t		β		n_y	
	k	α	k	α	k	α	k	α
Значение	155	0,4	130	0,7	-0,1	0,1	-0,05	0,55

Сопоставление скорректированных по предложенной методике поверхностей пластического течения с результатами лабораторных исследований представлены на рисунке 3.

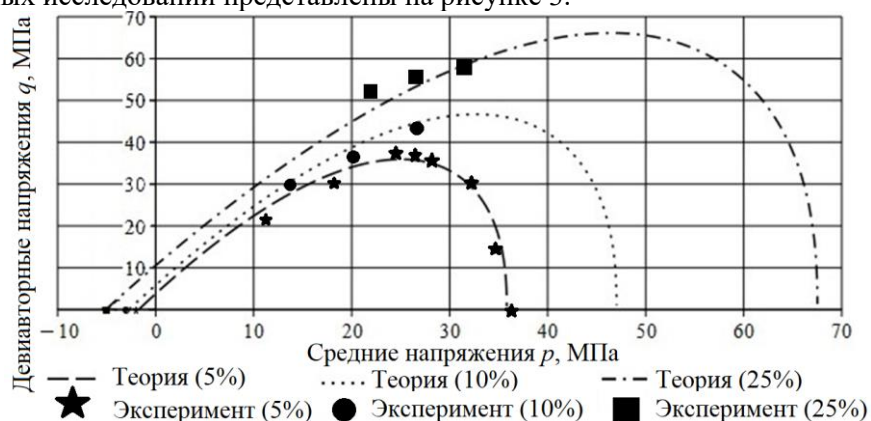


Рисунок 3 – Сравнение предельных поверхностей пластического течения

Сравнение экспериментальных и прогнозных данных показывает удовлетворительную сходимость между полученными результатами в диапазоне содержания цементного заполнителя от 5 до 25%.

3. Механизм формирования отпора закладочного массива деформациям породного целика определяется в зависимости от степени заполнения камеры, так, при ее заполнении до 80% определяющую роль играет сдвиговая прочность материала, а при более полном заполнения доминирующим становится его сопротивление объемному сжатию.

Поддерживающий эффект от закладочного массива в значительной степени зависит от совместной работы с целиками. Эффект был исследован с учетом верифицированных моделей закладочного материала. На основании построенных численных моделей взаимодействия междукамерного целика и закладочного массива изучены следующие факторы:

1. Влияние выбора модели, описывающей механический отклик закладочного материала;
2. Влияние степени заполнения выработанного пространства V закладочным материалом на НДС междукамерного целика;
3. Влияние закладочного материала на интенсивность нормальных напряжений междукамерных целиков (далее «степень нагружения»), выраженных в инварианте q по критерию Мизеса, при содержании нерастворимого остатка (далее «Н.О.») в материале междукамерного целика порядка 5 и 10%.

Использование упругой модели и модели Кулона-Мора значительно снижало напряжения, действующие в целике, в сравнении с моделью Soft Rock Plasticity. Так, упругая модель снижала напряжения в 2,8 раза, а модель Кулона-Мора в 1,35 раз.

Заполнение выработки закладочным материалом до $V = 80\%$ позволяет оказывать боковой отпор за счет сдвиговой прочности, что иллюстрируется белыми пунктирными линиями, которые обозначают поверхности скольжения в области закладочного массива, на рисунке 4. Однако при большей полноте заполнения происходит посадка кровли на закладочный массив, который начинает воспринимать вертикальную нагрузку за счет упрочнения и сопротивления объемному сжатию.

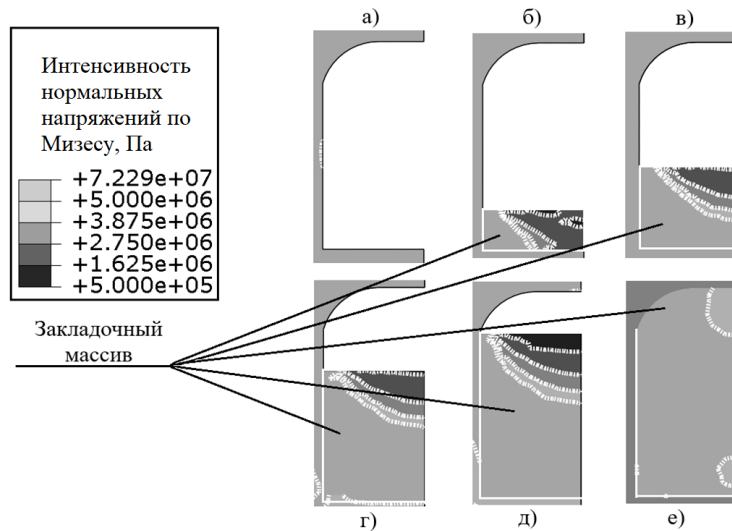


Рисунок 4 – Распределение интенсивности нормальных напряжений по Мизесу в сечении целика (10% Н.О.) при заполнении камеры закладочным массивом на основе раздробленных соляных пород на: а) 0%; б) 20%; в) 40%; г) 60%; д) 80%; е) 100%

Количественно эффективность закладочного материала в снижении нормальных напряжений действующих в междуканальных целиках с различным содержанием нерастворимого остатка можно описать коэффициентом снижения напряжений $k_{сн}$, который определяется как соотношение интенсивности нормальных напряжений, действующих в целике в условиях отсутствия закладки выработанного пространства, к аналогичной величине напряжений, действующей в целике в условиях заложения выработанного пространства на заданную величину V , что иллюстрируется на рисунке 5.

Настоящий коэффициент предлагается использовать при расчете степени нагружения междуканального целика, которая не должна превышать длительной прочности материала целика при одноосном сжатии по следующему условию (5):

$$R_{сж}^{дл} > k_{сн} S_M^{дл}, \quad (5)$$

где $R_{сж}^{дл}$ – длительная прочность материала междукамерного целика при условии одноосного сжатия; $S_m^{дл}$ – степень нагружения, определяемая на расчетный срок прогноза НДС целика без закладки выработанного пространства в рамках численного моделирования с применением модели материала целика Double Power Law.

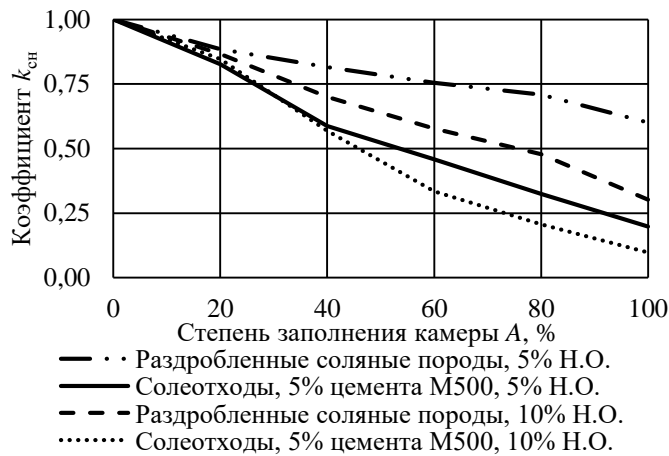


Рисунок 5 – Номограммы к определению коэффициента снижения напряжений

В сравнении с действующей нормативной методикой предложенный подход позволяет учесть нелинейное влияние закладочного материала на НДС междукамерного целика. Использование настоящей номограммы позволяет выбрать требуемый закладочный материал и минимальную полноту заполнения камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены результаты исследовательской работы с целью повышения достоверности прогноза НДС междукамерных целиков и закладочного массива при их совместном взаимодействии с применением обоснованной модели деформирования закладочного массива. В ходе исследования были достигнуты следующие ключевые результаты:

1. Установлено, что с ростом среднего напряжения угол внутреннего трения раздробленных соляных пород снижается по логарифмическому закону. Учет этой зависимости устраняет погрешность, свойственную классическим моделям с постоянным углом

внутреннего трения, что является необходимым условием для повышения достоверности прогноза НДС.

2. Доказано, что деформирование закладочного материала при нормальном уплотнении соответствует ассоциированному закону пластического течения. Это является физическим обоснованием для применения геомеханических моделей шатрового класса, которые корректно воспроизводят процесс уплотнения, как следствие повышения достоверности прогноза объемных деформаций.

3. Выявлен механизм разрушения закладочного материала при введении цементационных связей: переход от хрупкого при малых уровнях обжатия к пластическому поведению при высоких. Это позволило описать оба режима деформирования в рамках единого подхода, устраняя необходимость применения разрозненных моделей.

4. Количественно описан механизм смены отпора закладочного массива при 80% заполнении камеры, что подтверждает способность разработанной модели достоверно прогнозировать НДС целиков в зависимости от ключевых параметров закладочных работ.

5. Разработаны номограммы для определения коэффициента снижения напряжений в целиках в зависимости от свойств материала целика, степени заполнения камер и типа закладочного материала. Эти зависимости являются прямым результатом повышения достоверности прогноза НДС и позволяют количественно и качественно обосновывать проектные решения.

6. Достоверность всех предыдущих выводов, полученных численным моделированием, комплексно подтверждена верификацией на основе данных лабораторных испытаний, которая показала сходимость результатов со средним значением величины достоверности аппроксимации $R^2 = 0,94$.

Разработанный подход к моделированию, основанный на комплексном лабораторном исследовании свойств закладочных материалов, позволяет углубить теоретические представления о процессах их деформирования и предложить практические рекомендации для инженерного проектирования. Дальнейшие исследования могут быть посвящены изучению термо-гидравлических и реологических свойств закладочных материалов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Карасев, М. А. Лабораторные исследования и анализ математических моделей деформирования раздробленных соляных пород / М. А. Карасев, А. А. Селихов, А. К. Бычин // Известия Уральского государственного горного университета. – 2023. – № 4(72). – С. 94-105. – DOI: 10.21440/2307-2091-2023-4-94-105.

2. Карасев, М. А. Лабораторное исследование закладочного материала на основе галитовых отходов / М. А. Карасев, А. А. Селихов, А. К. Бычин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 23. – С. 180-188. – DOI: 10.26160/2658-3305-2023-23-180-188.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Ильинов, М. Д. Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин / М. Д. Ильинов, Д. Н. Петров, Д. А. Карманский, А. А. Селихов // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8, № 4. – С. 290-302. – DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150.

4. Петров, Д. Н. Исследование возможности применения методов неразрушающего контроля для оценки прочностных свойств горных пород в условиях подземного рудника Гремячинского месторождения / Д. Н. Петров, В. И. Абашин, М. А. Карасев, А. А. Селихов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 12-1. – С. 227-244. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_227.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024622340 Российская Федерация. База данных закладочных материалов месторождений водорастворимых руд. Заявка № 2024622079: заявл. 23.05.2024; опубл. 29.05.2024/ М. А. Карасев, А. А. Селихов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 182,29 КБ.