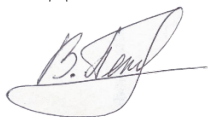


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Петрушин Владислав Владимирович



ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ
ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ В СОЛЯНЫХ МАССИВАХ НА
МАКРОМАСШТАБНОМ УРОВНЕ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Карасев М.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОЛЯНЫХ ПОРОД КАК ГЕОМАТЕРИАЛА И ИХ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ.....	12
1.1 Анализ микроструктурных особенностей соляных пород.....	13
1.1.1 Генезис соляных пород.....	14
1.1.2 Сравнение с аналогичными по генезису породами	15
1.2 Анализ механического поведения солей при различных условиях	16
1.2.1 Микроструктура и особенности механического поведения каменной соли	16
1.2.2 Поведение каменной соли при кратковременных испытаниях	19
1.2.3 Поведение каменной соли при длительных испытаниях	19
1.2.4 Влияние температурного воздействия на механическое поведение соли	20
1.2.5 Влияние вектора напряжений на мгновенное разрушение каменной соли.....	20
1.2.6 Влияние скорости деформации/нагружения на механическое поведение	21
1.3 Анализ подходов к формированию синтетических поликристаллических структур	22
1.3.1 Методы Монте-Карло	23
1.3.2 Клеточные автоматы	23
1.3.3 Фронтные методы (Level Set Methods).....	24
1.3.4 Метод фазового поля	24
1.3.5 Метод тесселяции Вороного	24
1.3.6 Применение метода тесселяции Вороного для моделирования структуры каменной соли	25
1.4 Анализ существующих подходов к макроструктурному моделированию механического поведения солей	28
1.5 Классификация существующих моделей.....	28
1.5.1 Нелинейная модель разрушения при ползучести для соляных пород.....	29
1.5.2 Микроструктурная конститутивная модель: Модель Гёнтера/Зальцера.....	31
1.6 Выводы по главе 1	33
ГЛАВА 2 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ СОЛЯНЫХ ПОРОД И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА ТЕССЕЛЯЦИИ ВОРОНОВА.....	36
2.1 Изучение макроструктуры соляных пород.....	37
2.1.1 Факторы, определяющие механическое поведение соляных пород	39
2.1.2 Описание методики генерации синтетической поликристаллической структуры каменной соли.....	41

2.1.3 Подбор параметров функции распределения Вейбула для описания формы и размеров кристаллов.....	43
2.1.4 Генерация синтетической поликристаллической структуры методом тесселяции Вороного	45
2.2 Лабораторные исследования прочности и деформируемости соляных пород	49
2.2.1 Особенности механического поведения соляных пород.....	49
2.2.2 Обоснование метода определения прочностных характеристик отдельных кристаллов.....	50
2.2.3 Программа испытаний	52
2.2.4 Результаты.....	53
2.3 Выводы по главе 2.....	55
ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА НДС СОЛЯНЫХ ПОРОД	57
3.1 Описание подхода к численному моделированию структуры в явном виде	58
3.2 Моделирование контактного взаимодействия между отдельными кристаллами соли..	59
3.2.1 Упругое поведение когезионных элементов	61
3.2.2 Критерий повреждения.....	62
3.2.3 Линейный закон разупрочнения	64
3.2.4 Экспоненциальный закон разупрочнения	65
3.2.5 Сравнительный анализ.....	66
3.2.6 Контактное взаимодействие между сплошными элементами после выхода из строя когезионных	70
3.2.7 Демпфирование системы и нивелирование энергии удара при выходе из строя когезионных элементов	70
3.2.8 Исследование степени влияния параметров модели на механический отклик системы.....	71
3.3 Определение степени влияния макроструктуры соляных пород на ее механическое поведение	74
3.3.1 Описание процесса деформирования и разрушения в рамках предложенного подхода.....	75
3.3.2 Масштабный эффект.....	78
3.3.4 Влияние размера и формы кристаллов на процесс деформирования и разрушения...	82
3.4 Выводы по главе 3.....	83
ГЛАВА 4 ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-ДИСКРЕТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ.....	85
4.1 Обоснование применения предложенного подхода	85
4.2 Определение характера деформирования ленточного целика в плоской постановке ...	87
4.2.1 Постановка задачи.....	87

4.2.2 Расчетная схема	89
4.2.3 Результаты.....	91
4.3 Определение характера деформирования стенок скважины в условиях гидростатического напряженного состояния	95
4.3.1 Постановка задачи.....	95
4.3.2 Граничные условия	96
4.3.3 Результаты.....	97
4.4 Возможные области применения предлагаемого подхода.....	102
4.5 Выводы по главе 4.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт об использовании результатов кандидатской диссертации ..	118
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В современном мире соль, в которой содержатся полезные минералы, является ценным ресурсом. Как сырье она используется во многих отраслях промышленности, начиная от сельского хозяйства и заканчивая химическим производством. Соль обладает рядом свойств, таких как низкая пористость, низкая проницаемость и высокая пластичность, что делает ее наиболее благоприятной породой для размещения в ней различных подземных сооружений. Определение эффективного объема хранения, проектирование соляных шахт и рудников, размещение объектов капитального строительства в соляных породах подразумевают глубокое изучение процессов деформирования и разрушения данного типа горных пород.

В настоящее время отечественные предприятия активно развивают и модернизируют процесс добычи полезного ископаемого на соляных месторождениях, таких как Гремячинское, Верхнекамское, Старобинское и Нивенское. Увеличение глубины разработки месторождений и объемов добычи приводит к интенсивному развитию геомеханических процессов в соляном массиве и как следствие к формированию новых инженерных задач, что требует модернизации математического аппарата для достоверного прогнозирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива с целью обеспечения безопасности. Так, например, вопросы формирования зон прорастания трещин в породных целиках, а также их деформирование в условиях отработки разработки месторождений, которые напрямую влияют на безопасность ведения работ, не могут быть в полной мере описаны в рамках существующих методик.

Одним из направлений развития моделей механического поведения геоматериалов является учет их макроструктурных особенностей. Разработка подхода к численному моделированию солей, основанного на методе конечно-дискретных элементов (МКДЭ) с явным представлением макроструктуры, является актуальной задачей в контексте современных вызовов геомеханики, горного дела и строительства. Актуальность такого подхода обусловлена необходимостью повышения точности прогнозирования НДС соляных массивов, которые используются для размещения подземных сооружений различного назначения. Традиционные методы численного моделирования, такие как метод конечных элементов (МКЭ) или метод дискретных элементов (МДЭ) обладают рядом ограничений: МКЭ демонстрирует низкую эффективность при моделировании разрывных деформаций и разрушения, а МДЭ, напротив, слабо адаптирован для анализа непрерывных сред. В этой связи комбинированный метод конечно-дискретных элементов, объединяющий преимущества обоих подходов, позволяет более адекватно описывать переход от непрерывного деформирования к дискретному разрушению, что особенно важно для соляных пород, характеризующихся хрупкопластичным поведением, ползучестью и чувствительностью к скоростям нагружения.

Упрощённые подходы, основанные на осреднённых свойствах или неявном описании неоднородностей, часто приводят к недооценке локальных концентраций напряжений, что критично для прогнозирования долговременной устойчивости подземных сооружений. Например, при проектировании водозащитной толщи при отработке соляных месторождений даже незначительные ошибки в оценке НДС могут спровоцировать катастрофические последствия, такие как неконтролируемое раскрытие трещин, что может привести к потере целого рудника. Явное представление макроструктуры в рамках МКДЭ позволяет учитывать геометрию трещин, границы между кристаллическими агрегатами и другие особенности, что существенно повышает достоверность моделирования процессов инициирования и распространения разрушений.

Ещё одним аспектом актуальности является растущая потребность в обеспечении безопасности производства работ в условиях увеличения глубины разработки месторождений и усложнения инженерных задач. Современные проекты требуют прогнозирования НДС на масштабах от микрометров (уровень кристаллов галита) до сотен метров (массив в целом). Традиционные методы не способны корректно описывать такие мультимасштабные процессы, тогда как МКДЭ благодаря гибридной природе позволяет интегрировать данные микроструктурного анализа в макромоделю, учитывая влияние межкристаллических границ, порового давления и температурных градиентов. Это открывает возможности для более точного определения зон повышенного риска и разработки превентивных мер, таких как оптимизация формы выработок или выбор режимов нагружения, что напрямую влияет на снижение аварийности.

Важно подчеркнуть, что развитие подобных методов стало возможным благодаря экспоненциальному росту вычислительных мощностей, включая распространение параллельных вычислений, GPU-ускорения и алгоритмов машинного обучения. МКДЭ будучи ресурсоёмким методом, требующим дискретизации как непрерывных областей, так и отдельных фрагментов при разрушении, ранее считался малоприменимым для задач инженерного масштаба. Однако современные суперкомпьютерные системы и эффективные алгоритмы управления контактами между элементами позволяют преодолеть эти ограничения. Например, использование адаптивных сеток и динамического перераспределения вычислительной нагрузки снижает затраты на моделирование без потери детализации. Таким образом, предлагаемый подход не только соответствует текущим технологическим возможностям, но и стимулирует дальнейшее развитие вычислительных методик, ориентированных на обработку больших объёмов данных и решение слабосвязанных многопараметрических задач.

Степень разработанности темы исследования

На сегодняшний день вопросами, посвященными изучению механизма деформирования и формированием подходов для описания механического поведения соляных пород как геоматериалов, занимался целый ряд отечественных исследователей: А.А. Барях, С.А. Константинова, А.О. Ермашов, Ю.А. Кашников, Ж.С. Ержанов, С.Г. Ашихмин и др.

Особенностями развития теории в вопросах оценки влияния макро- и микроструктурных особенностей солей занимались такие ученые, как Hunsche U., Hampel A., Urai, J., Spiers C., Hirth J.P., Lothe J., Cristescu N., Khaledi K, Gu'nther R-M, Salzer K.

Yang W., Ma L., Zhang L., Sterpi D., Chen B.-R., Li H., Müller C., Sun F. занимались исследованиями в области развития теории механики повреждения поликристаллических материалов.

Вопросам формирования статистически достоверной синтетической структуры, параметры которой определяли бы механическое поведение соли как геоматериала, не было уделено достаточно внимания. Большинство исследователей посвятили свои работы описанию механического поведения солей в рамках механики сплошной среды, часть ученых учитывала микроструктурные особенности косвенно основываясь на ряде упрощений, и лишь единицы рассматривают соль как поликристаллическую конечно-дискретную среду.

Тем не менее существует необходимость в разработке комплексного подхода к математическому описанию механического поведения соляных пород с учетом влияния их макроструктурных особенностей. Данный подход должен описывать вопросы формирования синтетических структур, а также расширять уже существующие теоретические положения по описанию процессов деформирования и разрушения структуры солей.

Объект исследований – породные обнажения соляных пород.

Предмет исследований – особенности деформирования и разрушения соляных пород на макроструктурном уровне.

Цель работы – повышение геомеханической безопасности и надежности прогноза напряжённо-деформированного состояния соляного породного массива за счет совершенствования модели деформирования и разрушения соляных пород.

Идея работы – совершенствование модели деформирования соляных пород достигается за счет представления соляных пород в виде набора поликристаллических структур, формируемых методом тесселяции Воронова, обеспечивающих междукристаллическое взаимодействие, зарождение и рост трещин, реализация которой выполняется в рамках метода конечно-дискретных элементов.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

1. Анализ научных публикаций по тематике исследования. Подготовка научного обзора.
2. Лабораторные исследования макроструктуры соляных пород. Обоснование параметров алгоритма тесселяции воронова для формирования поликристаллических структур каменной соли.
3. Лабораторные исследования деформирования и разрушения соляных пород на макро структурном уровне.
4. Разработка теоретических положений деформирования и разрушения соляных пород при их представлении в виде набора взаимодействующих между собой поликристаллических структур.
5. Исследования влияния параметров и верификация численных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния поликристаллических структур на их механическое поведение.
6. Исследование развития деформаций в окрестности породных обнажений соляных массивов.

Научная новизна работы:

1. Сформировано теоретическое представление о механической модели деформирования каменной соли как поликристаллической структуры. Предложенный подход рассматривает каменную соль не как однородную среду, а как поликристаллическую структуру, состоящую из множества кристаллических зерен с различной ориентацией и свойствами. Это позволяет учесть микромеханические процессы на уровне отдельных зерен, таких как: деформация кристаллов, межзеренное взаимодействие и образование трещин. Для анализа используются методы компьютерного моделирования (например, метод конечных элементов или дискретные модели), которые интегрируют данные о геометрии зерен, их границах и распределении примесей. Такой подход обеспечивает более точное описание неоднородности материала, что критически важно для прогнозирования его поведения в реальных условиях.
2. Получены зависимости влияние макроструктуры на механические свойства. Исследование выявило ключевые закономерности взаимосвязи между макроструктурой каменной соли и её механическими характеристиками. Установлено, что размер зерен, их пространственное распределение, а также наличие микродефектов и примесей существенно влияют на прочность, пластичность и устойчивость материала к разрушению.
3. Разработан подход к формированию синтетических поликристаллических структур идентичных по функциям распределения размера и формы отдельных кристаллов реальными поликристаллическим структурам.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам:

п. 1. Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений.

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

п. 7. Создание на основе цифровых информационных технологий методов, приборов, автоматизированных систем для изучения и контроля свойств горных пород и грунтов, строения и состояния их массивов, а также для прогнозирования динамических процессов и явлений.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика формирования синтетической структуры соли, основанная на обработке гранулометрического состава образцов породы.

2. Исследовано влияния параметров макроструктурных моделей на характер деформирования и разрушения соляных пород.

3. Разработана методика проведения лабораторных исследований для определения прочностных и деформационных свойства отдельных кристаллов соли.

4. Разработана методика построения численных моделей процесса деформирования и разрушения соляных пород на макроструктурном уровне.

5. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ, предназначенная для внедрения когезионных элементов в сетку сплошных элементов первого порядка в Abaqus CAE.

6. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию при определении параметров крепи вертикальных стволов на различных месторождениях полезных ископаемых, добываемых подземным способом, и применены в проектной деятельности компании АО «Гипроцветмет». Акт о внедрении от 28.11.2024 г., утвержден управляющим директором Курановым А.Д (Приложение А).

Методология и методы исследования.

Исследования, которые легли в основу диссертационной работы, проводились с применением комплекса методов. Так для определения физико-механических свойств как образцов каменной соли, так и отдельных кристаллов применялись лабораторные методы исследования. Разработка методики по формированию синтетической структуры соли

подразумевает проведение исследований методами математической статистики. Для оценки степени устойчивости породных обнажений применялись численные методы анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Доказано, что формирование поликристаллических структуры методом тесселяции Вороного позволяет качественно и количественно описать процесс деформирования на макроструктурном уровне, так и получить достоверный отклик рассматриваемой поликристаллической структуры соляных пород на внешнее воздействие.

2. Установлено, что характер распределения, форма и размер различных фракций в объеме поликристаллических элементов (зерен) определяет характер деформирования и разрушения соляных пород, а именно при увеличении степени угловатости кристаллов происходит снижение прочности образцов.

3. Характер и интенсивность смещений контура породных обнажений, а также дилатансионные процессы на участке, где ожидается запредельное деформирования солей, следует определять в рамках конечно-дискретного подхода при рассмотрении массива в виде набора поликристаллических структур.

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 проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

XVIII Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (15-21 мая 2022 г., г. Санкт-Петербург);

XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (29 мая - 01 июня 2024 г., г. Санкт-Петербург);

XXXIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2025» (06 февраля 2025 г., г. Москва.

Личный вклад автора: автором были поставлены задачи диссертационного исследования, проанализирован большой перечень отечественных и зарубежных научных трудов по тематике исследования, разработаны методические подходы к оценке структуры каменной соли и их статистической обработке. Также автором было обосновано применение методики испытания образцов горных пород сферическими инденторами для оценки физико-механических

свойств отдельных кристаллов соли, сформирован подход к численному модулированию процесса деформирования и разрушения каменной соли, получен ряд закономерностей, определяющий степень влияния макроструктуры соли на ее механическое поведение. Расширены возможности программного пакета Abaqus CAE посредством внедрения процедуры по внедрению когезионных элементов в сетку сплошных элементов первого порядка. Сформирован ряд рекомендаций по моделированию породных обнажений в соляных массивах методом конечно-дискретных элементов, где ожидаются запредельное деформирование породного контура.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 2, 3, 8, 49), в том числе в 1 статье - 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, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получено 1 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б).

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 121 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 4 таблицы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОЛЯНЫХ ПОРОД КАК ГЕОМАТЕРИАЛА И ИХ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ

На сегодняшний день соль, в которой содержатся полезные минералы, является ценным ресурсом. Как сырье она используется во многих отраслях промышленности, начиная от сельского хозяйства и заканчивая химическим производством. Соль обладает рядом свойств, таких как низкая пористость, низкая проницаемость и высокая пластичность, что делает ее наиболее благоприятной породой для размещения в ней различных подземных хранилищ: природного газа [60], сырой нефти [107] и энергии сжатого воздуха [13]. Определение эффективного объема хранения, проектирование соляных шахт и рудников, размещение объектов капитального строительства в соляных породах подразумевают глубокое изучение процессов деформирования и разрушения данного типа горных пород.

Как показывает практика, соляной массив склонен к проявлению реологических процессов, проявляющихся в виде ползучести и релаксации, особенно это характерно для глубоких месторождений (на расстоянии более 500 м от поверхности земли), где распределение напряжений в породе близко к гидростатическому. Реологические свойства солей определяют постоянный рост смещений контура подземного сооружения как на стадии строительства, так и его эксплуатации и как следствие - потеря эффективного объема [101], а также развития других негативных геомеханических процессов.

Таким образом, для правильной оценки и прогнозирования поведения горной массы вокруг строящихся объектов, будь то камеры большого сечения или небольшие скважины, необходимо иметь четкое представление о процессах мгновенного и длительного деформирования каменной соли при различных условиях нагрузки и разном температурном воздействии. В настоящее время наиболее распространенным и актуальным является экспериментальный метод определения механических характеристик каменной соли. Однако продолжительность испытаний по определению параметров ползучести составляет от нескольких дней до нескольких месяцев [115], что значительно меньше периода эксплуатации сооружения. Такой подход может привести к неточному прогнозу длительных деформаций, а, следовательно, и к проблемам в работе сооружений, вплоть до аварий.

На основании существующих теоретических принципов и экспериментальных данных создаются геомеханические модели для изучения длительного поведения соляных пород. В настоящее время среди всего многообразия подходов к моделированию солей можно выделить: эмпирические модели, комбинированные компонентные модели, а также составные модели длительного деформирования. Эмпирические модели обычно описываются экспериментальными данными с небольшим количеством параметров и широко используются для прогнозирования поведения солей. Комбинированные модели основаны на сочетании

простых теоретических принципов, таких как пружина Гука и фрикционный элемент. Сложность использования таких моделей заключается в определении их начальных параметров. Модели длительного деформирования, основанные на эволюционных признаках, больше подходят для определения степени макро-повреждений каменной соли. Все приведенные выше модели описывают соль в рамках механики сплошной среды и учитывают ее структурные особенности лишь косвенно.

Альтернативным и перспективным подходом к изучению механического поведения солей является создание численных моделей, основанных на микроструктурном представлении среды с использованием метода дискретных элементов. Подобный подход позволяет математически описать поведение солей при кратковременном и длительном нагружении с высокой степенью достоверности и учесть их фактическую структуру. На сегодняшний день этот подход широко используется в научной среде для изучения особенностей деформирования и разрушения различных материалов, например, сталей, бетонов, композитных материалов и др.

1.1 Анализ микроструктурных особенностей соляных пород

Соляные горные породы представляют собой одни из наиболее интересных и важных геологических структур. Они характеризуются уникальными микро- и макроструктурными свойствами. Микроструктура этих пород обычно включает набор кристаллов, таких как галит, гипс и соли калия и магния. Цвет, текстура и форма этих кристаллов варьируются в зависимости от условий образования и особенностей их кристаллической решетки. Каменная соль формируется путем осаждения из рассолов и обладает уникальными характеристиками, такими как высокая пластичность, низкая прочность на разрыв и способность к деформации под высоким давлением, что делает её сложной для математического моделирования процессов деформации и разрушения.

Известно, что физико-химические характеристики соли и характер геомеханических процессов под воздействием человека зависят от микро- и макроструктуры. Каменная соль состоит из кристаллов галита, которые имеют кубическую форму и варьируются по размеру от миллиметров до нескольких дециметров. Обычно эти кристаллы прозрачны и бесцветны, однако их оттенок может изменяться из-за наличия примесей. Макроструктура может быть как однородной, так и неоднородной, различаясь по размерам и формам кристаллов в зависимости от условий их образования.

Анализ макро- и микроструктуры солей активно развивается, что касается изучения генезиса каменной соли как геологического элемента. На данный момент важным направлением остаётся исследование влияния макроструктурных характеристик на механическое поведение соляных пород. Форма и размер кристаллов, а также наличие различных включений и

дислокаций существенно влияют на механические свойства материала. Каменная соль состоит из натриевых и хлорových ионов и обладает кубической симметрией. Пространственное расстояние между ионами составляет примерно 0,28 нм, что приводит к плотности этого вещества около 2,16 г/см³. В кристаллической структуре каменной соли ионы натрия могут быть заменены другими ионами, что, в свою очередь, приводит к образованию различных разновидностей галита с уникальными характеристиками. Например, замена натриевых ионов на калийные приводит к образованию сильвина, обладающего отличными физическими и химическими свойствами.

1.1.1 Генезис соляных пород

Соляные породы, или галогенные породы играют ключевую роль в геологии и геохимии [95]. Их образование связано с процессами испарения морской или континентальной воды [47], что приводит к отложению минеральных солей. Наиболее распространенные виды соляных пород включают галит, гипс, ангидрит, а также другие менее распространенные минералы [73]. Данная работа посвящена детальному рассмотрению структуры и микроструктуры соляных пород, а также их сравнению с аналогичными по генезису породами.

Соляные породы формируются в результате процессов, происходящих в специфических условиях испарительных бассейнов, где высокая концентрация растворенных солей приводит к их осаждению [43]. В зависимости от химического состава воды и температуры процесс осаждения может варьироваться, что влияет на минералогический состав и микроструктуру пород. Основные виды соляных пород включают:

Галит (NaCl) - наиболее распространенный минерал среди соляных пород. Образуется при испарении морской воды и обладает кубической кристаллической структурой.

Гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) - формируется в менее концентрированных соляных растворах и часто встречается вместе с галитом.

Ангидрит (CaSO_4) - безводная форма гипса, образующаяся при дальнейшем испарении и дегидратации гипса.

Карналлит ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) - встречается реже, образуется в высококонцентрированных магниальных бассейнах.

Макроструктура соляных пород [88] варьируется от массивных кристаллических массивов до слоистых отложений. Массивные структуры характерны для галитовых тел, которые могут достигать значительных размеров. Слоистые отложения обычно представлены чередующимися слоями различных солей, что отражает изменения в условиях осаждения. Важной характеристикой макроструктуры является наличие тектонических и диапировых структур, образованных под воздействием пластических деформаций солей. Диапиры - это

куполообразные структуры, которые возникают из-за восходящего движения солей под действием их низкой плотности и пластичности. Микроструктура соляных пород зависит от типа минералов и условий их образования. Основные элементы микроструктуры включают:

Кристаллическая структура - кристаллы солей могут иметь различные формы и размеры в зависимости от условий кристаллизации. Галит обычно формирует кубические кристаллы, тогда как гипс образует таблитчатые или игольчатые кристаллы.

Текстуры осаждения характерны для соляных пород и включают ламинации, ритмичные слои, инклюзии и поровые пространства. Эти текстуры указывают на переменные условия осаждения и концентрации растворов.

Деформационные структуры - соляные породы часто демонстрируют признаки пластической деформации, включая разрывы, складки и фразуры, что связано с их высоким пластическим потенциалом.

1.1.2 Сравнение с аналогичными по генезису породами

Для сравнения соляных пород с аналогичными по генезису породами рассмотрим карбонатные [85] породы, также формирующиеся в осаждающихся средах, но отличающиеся по химическому составу и условиям формирования.

Карбонатные породы включают известняки и доломиты, формирующиеся главным образом в морских условиях через биохимические и хемогенные процессы осаждения карбоната кальция и магния. В отличие от соляных пород, карбонатные имеют более разнообразные микроструктуры [31], часто включающие биокластические, оолитовые и пелоидальные текстуры.

Макроструктурные особенности карбонатных пород могут включать массивные, рифовые и слоистые [98] формы. Массивные известняки часто формируют карбонатные платформы, тогда как рифовые известняки свидетельствуют о биологической активности и разнообразии. Слоистые структуры отражают цикличные изменения в осадочной среде. Микроструктура карбонатных пород варьируется от микрокристаллических кальцитов (микрит) до крупнокристаллических зерен (спарит). В отличие от соляных пород, карбонаты часто содержат фоссилии и биокласты [48], что указывает на биологическое происхождение материала.

Минералогический состав - соляные породы в основном состоят из солей (галит, гипс, ангидрит), тогда как карбонатные породы включают карбонаты кальция и магния.

Условия формирования - соляные породы образуются в результате испарения, тогда как карбонатные породы могут формироваться как в результате химических реакций, так и биологических процессов.

Текстурные особенности - соляные породы чаще имеют ритмичные текстуры осадения, тогда как карбонатные породы демонстрируют разнообразные биокластические и оолитовые структуры.

Деформационные особенности - соляные породы характеризуются высокой пластичностью, что приводит к образованию тектонических структур, таких как диапиры, тогда как карбонатные породы менее подвержены пластическим деформациям.

Соляные породы представляют собой уникальную группу осадочных пород, характеризующихся специфическими условиями формирования и уникальной структурой. Их макро- и микроструктурные особенности тесно связаны с процессами испарения и концентрации солей в растворе. Сравнение с карбонатными породами, также образующимися в осаждающихся средах, подчеркивает уникальность соляных пород и их значимость в геологических процессах. Их пластические свойства и способность к деформациям делают их важными объектами изучения в контексте тектонических процессов и формирования крупных геологических структур.

В целом, понимание структуры и микроструктуры соляных пород, а также их сравнение с аналогичными по генезису породами, позволяет глубже проникнуть в процессы осадения и деформации, что имеет важное значение для геомеханики, геологии, геохимии и смежных дисциплин.

1.2 Анализ механического поведения солей при различных условиях

1.2.1 Микроструктура и особенности механического поведения каменной соли

Каменная соль имеет поликристаллическую структуру материала со средней плотностью около 2000 кг/м³. Структурно горная порода состоит из отдельных частиц, называемых зёрнами, которые, в свою очередь, делятся на более мелкие части, известные как «субзёрна» [44]. Размер зёрна находится в диапазоне от 1 мм до нескольких дм. Также известно, что каменная соль в основном состоит из галита (NaCl), содержащего примеси и вторичные включения в границах между зёрнами или порами [86].

Кристаллическая решетка – это периодическое расположение атомов в кристалле. В отличие от идеальных кристаллов, решетчатая структура каменной соли имеет определенные дефекты (любое отклонение от идеального расположения решетки). Неупругое поведение солей и их механические свойства напрямую зависят от дефектов кристаллической решетки. Дефекты кристаллической решетки классифицируются следующим образом [40]:

- точечные дефекты (0-мерные дефекты)
- линейные дефекты (1-мерные дефекты):
- плоские дефекты (2-мерные дефекты):

- объемные дефекты (3-мерные дефекты):

Соляные породы, в первую очередь галит, гипс и ангидрит, широко распространены в геологических структурах и играют значительную роль в процессах тектоники и геомеханики. Их уникальные макроструктурные и микроструктурные характеристики определяют их механическое поведение при различных напряженных состояниях.

Рассмотрим влияние макроструктуры соляных пород на их механическое поведение, а также описываются процессы разрушения и теории разрушения "по границам кристаллов" и "внутрикристаллического разрушения". Макроструктура соляных пород включает несколько ключевых элементов, таких как массивные кристаллические массивы, слоистые отложения и тектонические структуры, такие как диапиры. Каждая из этих структурных характеристик оказывает специфическое влияние на механическое поведение пород.

В соляных породах массивная структура обычно представляет собой большие монолитные кристаллы, которые могут демонстрировать высокую степень пластичности. Эта пластичность связана с низкой прочностью на сдвиг и высоким коэффициентом внутреннего трения, что позволяет кристаллам деформироваться без разрушения при умеренных напряжениях.

Слоистые структуры, часто встречающиеся в соляных отложениях, могут значительно влиять на механическое поведение пород. В таких структурах слои различных минералов или текстур действуют как зоны слабости, способствуя разрывам и сдвигам под воздействием напряжений. Ориентация слоев относительно направления приложенного напряжения играет ключевую роль в формировании трещин и структурных нарушений.

Тектонические структуры. Диапиры и другие тектонические структуры образуются за счет пластических деформаций соляных пород под действием их низкой плотности и высокой пластичности. Эти структуры могут деформироваться в условиях высокого давления, что приводит к значительным изменениям в механических свойствах пород.

Механическое поведение соляных пород определяется их способностью к пластическим деформациям и разрушению при различных типах напряжений: сжимающих, растягивающих и сдвиговых. При сжимающих напряжениях массивные соляные породы демонстрируют высокую пластичность. Они могут деформироваться под действием давления, образуя складки и другие тектонические структуры без значительного разрушения. Это свойство особенно важно для формирования диапиров и соляных куполов, где соли поднимаются через вышележащие породы. При растягивающих напряжениях соляные породы проявляют меньшую пластичность и склонны к образованию трещин и разрывов. Слоистые структуры могут способствовать развитию этих трещин, особенно если слои ориентированы перпендикулярно к направлению растягивающих напряжений. При сдвиговых напряжениях соляные породы демонстрируют комбинацию

пластического деформирования и разрушения. В местах концентрации сдвиговых напряжений, таких как границы кристаллов или слои, могут возникать разрывы и сдвиги.

Разрушение соляных пород происходит через два основных механизма: разрушение по границам кристаллов и внутрикристаллическое разрушение.

Разрушение по границам кристаллов. Данный процесс включает образование и распространение трещин вдоль границ кристаллов. Он характерен для структур с выраженными границами между кристаллами, где напряжения концентрируются на этих границах. Трещины, возникающие вдоль границ, могут распространяться и соединяться, приводя к макроскопическому разрушению породы. Этот тип разрушения часто наблюдается в условиях высоких напряжений, когда силы, приложенные к породе, превышают прочность связей на границах кристаллов.

Внутрикристаллическое разрушение. Этот процесс включает образование трещин внутри кристаллов. Внутрикристаллическое разрушение происходит через дислокации и другие дефекты кристаллической решетки, которые концентрируют напряжения и способствуют образованию микротрещин внутри кристаллов. Внутрикристаллическое разрушение чаще происходит в условиях, когда порода подвергается значительным пластическим деформациям, при этом кристаллы могут поглощать и перераспределять напряжения через свои структуры.

Теория разрушения по границам кристаллов основана на представлении о том, что разрушение начинается и распространяется вдоль границ между отдельными кристаллами. Это связано с тем, что границы кристаллов являются зонами концентрации напряжений, где силы, приложенные к породе, превышают прочность связей между кристаллами. Данная теория подтверждается наблюдениями за процессами разрушения в соляных породах, где трещины часто возникают и распространяются вдоль границ кристаллов. Этот тип разрушения характерен для породы с хорошо выраженной кристаллической структурой и четкими границами между кристаллами.

Теория внутрикристаллического разрушения основывается на представлении о том, что разрушение происходит внутри кристаллов из-за накопления дефектов и дислокаций в кристаллической решетке. При этом микротрещины образуются внутри кристаллов, распространяясь и соединяясь друг с другом, что приводит к макроскопическому разрушению породы. Внутрикристаллическое разрушение характерно для пород, подвергающихся значительным пластическим деформациям, где напряжения распределяются внутри кристаллов и вызывают их разрушение.

Макроструктура соляных пород оказывает значительное влияние на их механическое поведение при различных напряженных состояниях. Массивные кристаллические массивы демонстрируют высокую пластичность при сжимающих напряжениях, тогда как слоистые

структуры склонны к разрывам и сдвигам при растягивающих и сдвиговых напряжениях. Процессы разрушения соляных пород включают механизмы разрушения по границам кристаллов и внутрикристаллическое разрушение, каждый из которых играет важную роль в определении механических свойств и поведения пород в различных геологических условиях.

Исследование и понимание этих процессов имеет ключевое значение для геологических и геотехнических приложений, включая прогнозирование поведения соляных пород в условиях добычи полезных ископаемых, строительства подземных хранилищ и других инженерных задач.

При низких величинах средних напряжений и высокой интенсивности касательных напряжений, соляные породы переходят от пластического поведения к хрупкому разрушению. В этих условиях образование межкристаллических трещин, вращение и скольжение отдельных зерен относительно друг друга являются важными аспектами, определяющими деформационные процессы и механическое поведение соляных пород в целом. Формирование микротрещин является причиной увеличения объема горной породы.

1.2.2 Поведение каменной соли при кратковременных испытаниях

Исследования в области разрушения микроструктуры солевых пород выявили следующие закономерности: после испытаний на одноосное сжатие в образцах чаще всего формируется несколько трещин (поверхностей ослабления), трещины в основном ориентированы вдоль осевого направления. Чем выше скорость деформирования образца, тем быстрее происходит формирование трещины между отдельными кристаллами соли. При одноосном нагружении развиваются как внутрикристаллические трещины, так и трещины на границах зерен. Многие внутрикристаллические трещины и трещины на границах зерен соединяются вместе и образуют крупные прерывистые трещины.

Механическое поведение каменной соли при кратковременных трехосных испытаниях было достаточно детально исследовано в ряде работ [74, 22, 97]. Как правило, в этих экспериментах к образцам каменной соли прикладывалось различное по величине боковое давление [41, 51, 56]. Граница разрушения каменной соли сильно зависит от прикладываемого бокового давления [26, 32, 46]. Другими словами, прочность на сжатие горных пород обычно увеличивается с увеличением величины бокового давления [25]. При низком боковом обжатии, каменная соль становится более хрупкой, и пиковая прочность достигается в разы быстрее [45, 23].

1.2.3 Поведение каменной соли при длительных испытаниях

Как известно, кривая объемной деформации солей имеет точку, в которой компрессия сменяется дилатансией. Многочисленные экспериментальные исследования [8], выполненные учеными, показывают, что в пространстве напряжений и деформаций есть граница, которая

разделяет зону напряжений, для которой характерно уменьшение объема каменной соли за счет упругого сжатия кристаллов соли и уменьшения пустотности, от зоны напряжений, для которой характерно увеличение объема при пластическом сдвиге, то есть эффекта дилатансии (например, см. [22], [1], [46], [89-24]). Соответственно, при заданном боковом давлении объемная деформация показывает переход от сжатия к расширению с увеличением приложенного девиаторного напряжения. Когда напряженное состояние пород соответствует зоне условного сжатия (то есть ниже границы дилатансии), наблюдается развивающееся во времени пластическое деформирование без формирования каких-либо видимых макроскопических трещин. Напротив, при уменьшении бокового обжатия или увеличении девиаторного напряжения происходит переход через границу дилатансии. В этом случае доминирующим механизмом развития деформаций в солях является формирование междукристаллических микротрещин. Эти процессы сопровождаются увеличением объема соли. Формирование микротрещин и развитие дилатансионных процессов имеют ряд последствий, таких как: быстрое увеличение проницаемости, выход на третью стадию ползучести и последующее разрушение породы [44]. Однако точное определение границы дилатансии является технически сложной задачей.

1.2.4 Влияние температурного воздействия на механическое поведение соли

В зависимости от способа воздействия на соляной массив при строительстве или от типа продукта хранения (например, сырая нефть, природный газ, сжатый воздух или водород – для подземных хранилищ) температура окружающей каменной соли может значительно варьироваться (обычно от 25 до 200 °C). Температура влияет на свойства материала каменной соли. Например, исследователи [97] показали, что прочность уменьшается в условиях высоких температур, а пластичность каменной соли увеличивается. В [97] также показано, что отношение объемных деформаций к деформациям формоизменения при проведении экспериментов в квазистатической постановке значительно увеличивается с увеличением температуры. Снижение прочностных и деформационных характеристик солей с увеличением температуры также отмечено в ряде исследований [51][78].

1.2.5 Влияние вектора напряжений на мгновенное разрушение каменной соли

В ряде исследований обсуждался эффект траектории напряжений на мгновенную прочность соли (например, [22]; [97]; [51];). На рисунке 1 (а) показаны полученные разрушающие напряжения при обычных испытаниях на сжатие, сдвиг и растяжение. Как видно, траектория напряжения играет важную роль в определении границы разрушения в трехосных экспериментах. Прочность соли при испытаниях на растяжение явно меньше, чем прочность, полученная при испытаниях на сжатие. По этой причине ряд исследователей приняли во

внимание влияние промежуточного компонента напряжения на механическое поведение солей. Следовательно, они определили границы разрушения, зависящие от угла Лоде, чтобы рассмотреть влияние траектории напряжений на краткосрочное поведение каменной соли (например, см. [51]; [46];). На рисунке 1(b) показана зависящая от угла Лоде граница разрушения в π -плоскости, введенная [26]. Как видно, зависимость границы разрушения от угла Лоде θ приводит к разным пиковым прочностям при трехосном сжатии ($\theta = 60^\circ$), сдвиге ($\theta = 30^\circ$) и растяжении ($\theta = 0^\circ$).

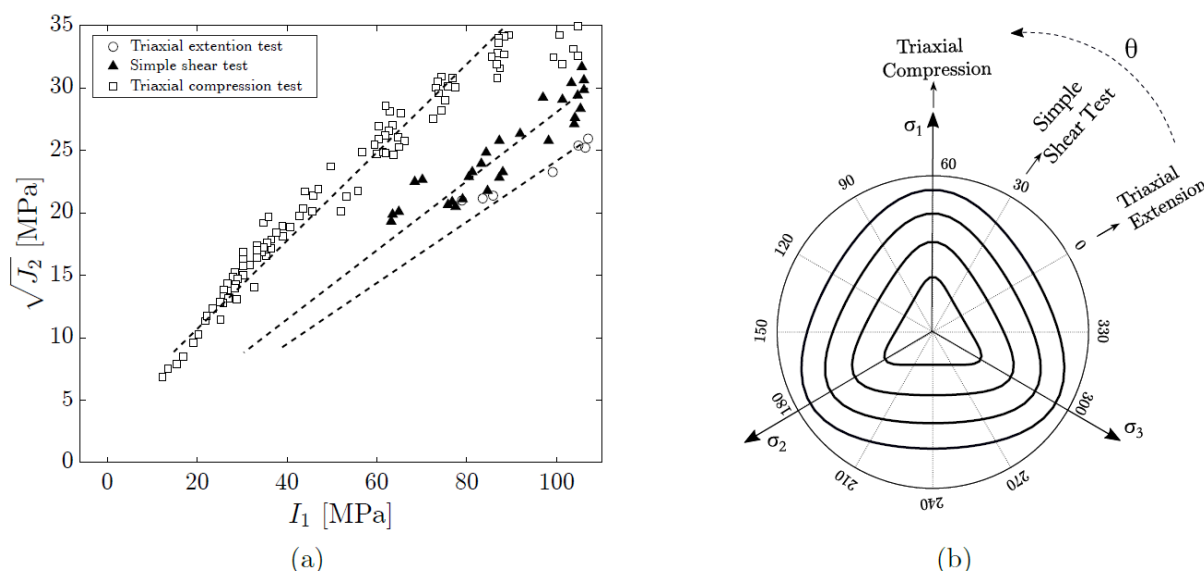


Рисунок 1 – (а) Зависимость прочности от траектории развития напряжений в кратковременных трехосных испытаниях (данные испытаний [22]); (б) Зависимая от угла Лоде поверхность разрушения, определенная [25]

1.2.6 Влияние скорости деформации/нагружения на механическое поведение

Как объяснялось ранее, граница разрушения при мгновенных испытаниях определяется с помощью трехосных квазистатических испытаний с определенными скоростями нагружения. Однако скорости, применяемые в этих испытаниях, относительно высоки по сравнению с полевыми условиями. Поэтому важно исследовать влияние скорости нагружения на механическое поведение соли. В отличие от других каменных материалов, до сих пор не было детально изучено влияние скорости нагружения на механическое поведение каменной, одним из не многих был [56]. Кроме того, в некоторых случаях полученные результаты не совпадают. Например, [45] провел серию испытаний на трехосное сжатие цилиндрических образцов из шахты Asse, расположенной в Германии. В этих испытаниях рассматривались различные величины сжимающих нагрузок (от 0 до 20 МПа) и различные скорости деформации (от 10^{-2} до 10^{-6} с^{-1}) для определения пиковой прочности каменной соли. На рисунке 2 (а) показаны

полученные предельные напряжения в этих испытаниях для рассматриваемых давлений и скоростей деформации.

Полученные значения показывают, что для постоянного давления сжатия предельная прочность каменной соли лишь незначительно зависит от скорости деформации. Как отмечается в работе [23], в отличие от хрупких пород, предел прочности каменной соли не изменяется со скоростью деформации. Однако из-за пластичности значение деформации при разрушении увеличивается при уменьшении скорости деформации. Более того, если испытание проводится при достаточно низком значении скорости деформации, то эксперимент становится испытанием на ползучесть с постоянным напряженным состоянием без кратковременного разрушения (но, возможно, с третичной ползучестью через длительное время, если напряженное состояние находится в зоне дилатансии [23]). Похожие результаты относительно независимой зависимости между границей разрушения и скоростью деформации были получены [57]. Однако [33] провели серию контролируемых нагрузкой трехосных испытаний кубических образцов из шахты Maha Sarakham в Таиланде. Полученные результаты для различных давлений сжатия (то есть от 0 до 20 МПа) и различных скоростей нагружения (то есть от 0,001 до 10 МПа/с) представлены на рисунке 2(б). Как видно, предел прочности каменной соли значительно увеличивается с увеличением скорости нагружения, особенно при. С другой стороны, они показали, что значение деформации при разрушении уменьшается с увеличением скорости нагружения.

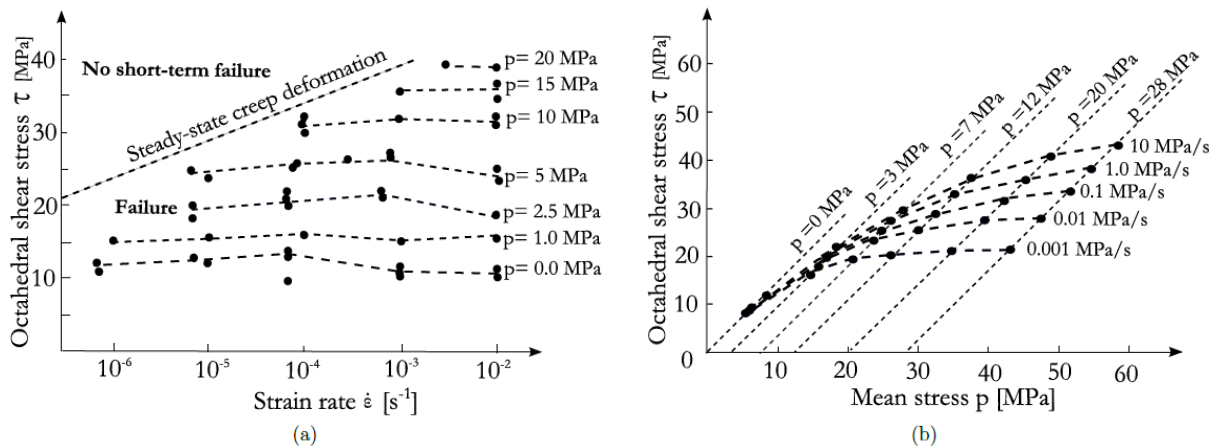


Рисунок 2 – (а) Прочность каменной соли, определенная по результатам испытаний на трехосное сжатие при различных значениях бокового давления и скоростей деформации [45]; (б) Прочность каменной соли, определенная по результатам испытаний на трехосное сжатие при различных давлениях и скоростях нагружения [33]

1.3 Анализ подходов к формированию синтетических поликристаллических структур

Генерация поликристаллических структур является ключевой задачей в материаловедении, особенно при моделировании материалов с множественными зёрнами, таких как металлы, минералы и керамика. Прогресс в компьютерном моделировании материалов

позволяет исследователям глубже изучить поведение поликристаллов под воздействием внешних условий, таких как температура, давление и механическая нагрузка. Поликристаллические материалы состоят из множества отдельных кристаллических зерен, соединенных друг с другом границами зерен. В зависимости от размеров зерен, их ориентации и химического состава могут меняться такие свойства материала, как прочность, пластичность, проводимость и коррозионная стойкость. Для того чтобы предсказать поведение таких материалов и создать модель их микроструктуры, необходимо использовать эффективные методы генерации поликристаллических структур.

Существует несколько подходов к генерации поликристаллических структур. Эти методы позволяют смоделировать структуру материала с учетом различных параметров, таких как ориентация зерен, форма и размер зерен, а также особенности взаимодействий на границах зерен.

1.3.1 Методы Монте-Карло

Методы Монте-Карло (МС) являются статистическими методами, которые используются для моделирования физических систем [67] путем случайного выбора состояния системы и минимизации ее энергии. Они широко применяются для симуляции роста зерен в поликристаллах [72]. Один из вариантов метода Монте-Карло — это метод роста зерен, при котором атомы добавляются к зернам на случайных участках, и система стабилизируется путем уменьшения свободной энергии. Этот метод позволяет моделировать эволюцию структуры зерен, учитывая такие факторы, как тепловое движение и влияние внешних полей [18]. Однако методы Монте-Карло имеют высокую вычислительную сложность, особенно при моделировании больших поликристаллических систем, и требуют значительных вычислительных ресурсов для достижения высокого уровня точности. Например, исследованиями, проведенными в области роста и коалесценции зерен, был установлен эффективный алгоритм Монте-Карло, который применялся для моделирования роста зерен в алюминиевых поликристаллах [117].

1.3.2 Клеточные автоматы

Клеточные автоматы (СА) представляют собой метод дискретного моделирования, где пространство делится на множество ячеек, каждая из которых может находиться в одном из конечных состояний, например, соответствовать кристаллографической ориентации. Эволюция системы определяется набором правил, по которым состояние ячейки изменяется в зависимости от состояния ее соседей. Клеточные автоматы нашли применение при моделировании роста и слияния зерен в поликристаллических материалах, таких как медь и железо. Данный метод удобен своей простотой и высокой скоростью работы, однако ограничивается тем, что не всегда может точно описать форму и размеры зерен, характерные для реальных материалов [14,114].

1.3.3 Фронтные методы (Level Set Methods)

Фронтные методы, такие как «Level Set» активно применяются для моделирования движущихся границ зерен [20]. В основе метода лежит идея описания границ зерен через скалярные функции, которые изменяются во времени, отражая процессы роста и слияния зерен. Эти методы особенно полезны для исследования динамики зерен в поликристаллах, включая процессы, происходящие при высоких температурах или под механической нагрузкой. Метод Level Set позволяет моделировать сложные взаимодействия между зернами и учитывать различные физические эффекты, такие как зернограничная диффузия [112]. В отличие от клеточных автоматов, фронтные методы обеспечивают более точное моделирование сложных форм зерен и границ, однако их вычислительная сложность также выше [108].

1.3.4 Метод фазового поля

Метод фазового поля [111] является одним из наиболее мощных инструментов для моделирования эволюции микроструктур поликристаллических материалов. В этом методе используется вспомогательная функция — фазовое поле, которое описывает состояние системы в каждом узле пространства. Изменение фазового поля с течением времени подчиняется уравнениям Ландау-Гинзбурга, которые учитывают термодинамические и кинетические эффекты в системе [29]. Метод фазового поля успешно применяется для моделирования таких явлений, как коалесценция зерен, образование трещин и зарождение новых фаз в материалах. Однако из-за сложности математического аппарата и необходимости решения уравнений в каждом узле сетки этот метод требует значительных вычислительных мощностей [80].

1.3.5 Метод тесселяции Вороного

Одним из наиболее популярных и простых в реализации методов генерации поликристаллических структур является метод тесселяции Вороного [93]. Тесселяция Вороного — это разбиение пространства на множество ячеек, каждая из которых представляет собой область, ближайшую к определенной точке-генератору. Эти ячейки могут использоваться для моделирования зерен в поликристаллических материалах, где каждый генератор соответствует центру зерна, а границы ячеек Вороного — границам зерен.

Метод тесселяции Вороного основывается на разбиении пространства на области, каждая из которых содержит точки, которые ближе к своему генератору, чем к любому другому. Это приводит к созданию ячеек, которые могут иметь различную форму и размер, но каждая ячейка является выпуклой [30]. Основное преимущество метода заключается в его простоте и возможности легко контролировать распределение зерен в поликристаллическом материале. Генераторы могут быть размещены случайным образом или в соответствии с определенными

законами распределения, что позволяет моделировать зеренные структуры с различными характеристиками.

Тесселяция Вороного широко применяется в материаловедении для моделирования поликристаллических структур, так как позволяет воспроизвести микроструктуры, похожие на реальные материалы [109]. Например, зерна металлов или минералов, как правило, имеют случайные формы и размеры, которые хорошо описываются ячейками Вороного. Этот метод нашел широкое применение для моделирования структур алюминия, стали, магния и других металлов, а также для изучения их механических свойств, таких как прочность, пластичность и трещиностойкость [11].

1.3.6 Применение метода тесселяции Вороного для моделирования структуры каменной соли

Каменная соль (NaCl) представляет собой один из наиболее распространенных и хорошо изученных минералов, который образует кристаллическую решетку с кубической симметрией. Каменная соль часто встречается в поликристаллической форме, что делает ее отличным объектом для изучения с использованием методов моделирования. Поликристаллы NaCl состоят из множества зерен с различной ориентацией, которые разделены границами зерен. Эти границы играют важную роль в механическом поведении материала, влияя на процессы ползучести, деформации и разрушения. В связи с этим, моделирование структуры каменной соли необходимо для прогнозирования ее поведения в различных условиях, например, при высоких давлениях или в процессе эксплуатации в соляных шахтах [44].

Применение метода тесселяции Вороного для генерации поликристаллической структуры каменной соли имеет ряд преимуществ. Во-первых, этот метод позволяет легко создать модель, в которой зерна имеют случайные размеры и формы, что соответствует реальной микроструктуре каменной соли. Реальные поликристаллы NaCl содержат зерна с разнообразными формами, и метод Вороного позволяет точно воспроизвести эту случайность. Во-вторых, метод Вороного позволяет моделировать границы зерен, которые играют важную роль в поведении материала. Например, в поликристаллической каменной соли границы зерен могут служить путями для диффузии атомов, а также местами, где возникает пластическая деформация при воздействии внешних нагрузок [12].

Кроме того, метод Вороного позволяет учитывать случайное распределение ориентаций зерен, что критично для моделирования механических свойств материала. Ориентация кристаллографических осей каждого зерна влияет на то, как оно будет деформироваться под воздействием внешних сил. Используя метод Вороного, можно сгенерировать модель с

произвольным распределением ориентаций зерен, что позволит учесть анизотропию материала и предсказать его поведение при нагружении [113].

Несмотря на все преимущества, метод тесселяции Вороного имеет и свои ограничения. Во-первых, он не всегда точно воспроизводит сложные структуры, наблюдаемые в некоторых материалах, например, материалы с выраженными текстурными характеристиками. Во-вторых, метод Вороного предполагает, что границы зерен в модели являются прямолинейными и плоскими, что может не полностью соответствовать реальной микроструктуре, где границы кристаллов могут иметь сложную, искривленную форму. Это ограничение особенно важно в тех случаях, когда форма границ зерен существенно влияет на поведение материала, например, в случае моделирования ползучести, где границы зерен могут деформироваться и мигрировать под воздействием внешних факторов.

Несмотря на вышеупомянутые ограничения, метод тесселяции Вороного доказал свою эффективность в ряде исследований, связанных с моделированием поликристаллических структур. Например, в работе [11] авторы успешно применили тесселяцию Вороного для генерации кристаллической структуры алюминия и моделирования механических свойств этого материала. Используя случайное распределение генераторов и соответствующую настройку параметров модели, они смогли с высокой точностью воспроизвести структуру, близкую к реальной микроструктуре алюминиевых сплавов.

Еще одним примером является исследование механических свойств магния, проведенное в [94], где тесселяция Вороного была использована для моделирования кристаллической структуры магниевых поликристаллов. В этой работе была рассмотрена связь между микроструктурой материала и его пластическими свойствами. Авторы показали, что случайное распределение зерен и их ориентировок в модели, созданной с помощью тесселяции Вороного, позволяет предсказать анизотропное поведение магния под механической нагрузкой.

Метод тесселяции Вороного также применялся для моделирования текстурированных материалов. В работе [113] авторы исследовали влияние зеренных границ на механические свойства материалов с определенной текстурой. Используя тесселяцию Вороного, они сгенерировали структуру, состоящую из зерен с различной ориентацией, и смоделировали их взаимодействие при деформации. Полученные результаты продемонстрировали важность учета зеренных границ и анизотропии материала для точного предсказания его механического поведения.

Хотя метод тесселяции Вороного обладает значительными преимуществами для моделирования поликристаллических структур, существуют возможности для его улучшения и расширения. Одной из таких возможностей является использование модифицированных версий метода Вороного, которые позволяют учитывать более сложные формы зерен и нелинейные

границы. Например, методы взвешенной тесселяции Вороного позволяют варьировать размеры и формы ячеек путем введения весов для различных зерен. Это позволяет создавать более реалистичные микроструктуры, в которых зерна могут иметь разнообразные формы и размеры, что лучше отражает реальную структуру многих материалов, включая каменную соль [116].

Еще одно направление развития — это интеграция метода Вороного с другими методами моделирования, такими как метод фазового поля или методы Монте-Карло. Такая интеграция может позволить моделировать динамическую эволюцию микроструктур, включая рост зерен, их коалесценцию и миграцию границ. Например, комбинирование метода Вороного с методом фазового поля может помочь моделировать изменения микроструктуры каменной соли под воздействием высоких температур или давления, что является важным аспектом при изучении ее поведения в природных условиях или при эксплуатации в подземных соляных шахтах [80].

Также существует необходимость в учете дефектов и включений в поликристаллическую структуру. Реальные материалы, включая каменную соль, содержат различные дефекты, такие как дислокации, микротрещины или включения других фаз. Эти дефекты могут существенно влиять на поведение материала при деформации или разрушении. Включение таких дефектов в модели, основанные на тесселяции Вороного, может улучшить точность прогнозирования механических и физических свойств материала. Например, можно рассматривать модель, в которой дефекты задаются как дополнительные генераторы или измененные границы зерен, что позволит более точно моделировать реальные условия [12].

Как отмечалось ранее, каменная соль — это поликристаллический материал, структура которого оказывает значительное влияние на ее механические свойства. Применение метода тесселяции Вороного для моделирования поликристаллической структуры каменной соли может дать ценные результаты в контексте прогноза ее поведения в различных условиях эксплуатации. Одним из ключевых факторов, влияющих на поведение каменной соли, является размер зерен. Чем мельче зерна, тем выше прочность и устойчивость материала к деформации, так как меньшие зерна препятствуют перемещению дислокаций, что затрудняет процесс пластической деформации. Метод Вороного позволяет генерировать модели с различными распределениями размеров зерен и изучать, как это влияет на механические свойства каменной соли, включая ее прочность, ползучесть и сопротивление трещинообразованию [44]. Еще одним важным аспектом является ориентация зерен. Поликристаллические материалы с кубической симметрией, такие как каменная соль, могут демонстрировать анизотропные свойства в зависимости от ориентации кристаллографических осей зерен. Используя метод Вороного, можно смоделировать поликристаллическую структуру с различным распределением ориентаций зерен и исследовать, как это влияет на механические и физические свойства материала. Например, в условиях высоких

давлений, характерных для подземных месторождений соли, ориентация зерен может существенно влиять на их деформацию и прочность [113].

Методы генерации поликристаллических структур играют важную роль в прогнозировании и моделировании поведения материалов, таких как каменная соль. Среди множества существующих методов, метод тесселяции Вороного является одним из наиболее простых и эффективных для моделирования кристаллической структуры поликристаллов. Он позволяет точно воспроизводить форму и размеры зерен, а также границы между ними, что делает его полезным инструментом для исследования механических свойств материалов.

1.4 Анализ существующих подходов к макроструктурному моделированию механического поведения солей

В настоящее время отечественные исследователи [4, 3, 1], для моделирования процессов деформирования и разрушения каменной соли в основном предлагают использование моделей, основанных на решении задач механики сплошной среды с некоторыми допущениями. Подобный подход является в большей степени прикладным и позволяет, корректно прогнозировать развитие геомеханических процессов для конкретных горно-геологических условий.

Для изучения механизма деформирования и разрушения материалов в большей степени подходят методы, основанные на микроструктурном подходе представления материала или среды, в частности, соляные породы могут быть представлены в виде поликристаллической структуры. В научной среде широко используется подход с применением тесселяции Вороного для описания микроструктуры сталей [82, 83, 15]. Подобный метод постепенно внедряется и для других поликристаллических материалов, например, каменной соли [63, 52, 54].

Предложенный в работе подход является перспективным и позволяет с высокой степенью точности описывать поведение каменной соли, что открывает новые возможности при проектировании объектов капитального строительства в таких породах.

1.5 Классификация существующих моделей

Феноменологические и микроструктурные исследования служат основой для разработки конститутивных моделей каменной соли. Подземное хранение энергоносителей в виде сырой нефти, жидких углеводородов или природного газа в кавернах каменной соли является актуальной темой для исследований в течение многих лет. Поэтому большое количество исследований было сосредоточено только на моделировании переходной и установившейся деформации ползучести. Эти модели были специально разработаны для прогнозирования долгосрочных деформаций ползучести в кавернах с относительно постоянным внутренним давлением (например, для каверн сезонного или годового хранения). Основной задачей в этих

группах исследований является описание вязкого поведения каменной соли, наблюдаемого в длительных экспериментах. Эти типы определяющих моделей применимы только для напряженного состояния ниже границы дилатансии. В этом случае такие эффекты дилатансии, как распространение повреждений, разрушение, изменение проницаемости, не важны.

Однако процесс проектирования каверн, в особенности тех, которые работают под циклическими термомеханическими нагрузками, становится более надежным, если модели охватывают все экспериментально наблюдаемые особенности. В связи с этим в последнее десятилетие были разработаны более сложные конститутивные модели в попытке предсказать поведение каменной соли в хрупкой области (то есть за границей дилатансии). Эти группы моделей дают возможность описать как краткосрочное, так и долгосрочное поведение каменной соли.

В другой классификации модели можно разделить на две группы по подходу к моделированию, то есть (1) макроструктурные модели (2) микроструктурные модели. В основном, макроструктурные модели используют механические концепции, такие как вязкоупругость, вязкопластичность или механику повреждений для описания разрушения.

Таким образом, наиболее интересными к рассмотрению являются макро- и микроструктурные модели.

1.5.1 Нелинейная модель разрушения при ползучести для соляных пород

Горные породы, особенно глубинные, постоянно испытывают воздействие внешней нагрузки и силы тяжести. Следовательно, все или большинство пород могут постепенно накапливать деформацию повреждения или характеристики деформации-ползучести в долгосрочной перспективе, что в конечном итоге приводит к повреждению различных структур породы, вызывая сильную пластическую деформацию или даже прогрессирующее разрушение ([34]; [50]; [62]; [70]). Хотя определение начала процесса ползучести горных пород остается сложной проблемой, она имеет важное значение для исследования горной техники, чтобы обеспечить безопасность производства и рабочих ([92]; [100]). Свойство ползучести горных пород имеет решающее значение для долгосрочной стабильности геотехнических структур. Углубленное во времени механическое поведение горных пород, подверженных сложным геологическим условиям, может быть описано моделью ползучести, которая является ключевой для анализа устойчивости и оценки безопасности. В результате, исследованию поведения горных пород при ползучести было посвящено много работ, большинство из которых были посвящены моделированию ползучести горных пород. Соответственно, были предложены различные модели ползучести горных пород. Основываясь на реологической модели Lubby2, представили новую модель ползучести, учитывающую вязкую деформацию, дислокации, деформационное

упрочнение, а также механизм восстановления деформации, повреждение и восстановление повреждений с помощью механики повреждений континуума. Они успешно применили эту модель в подземных кавернах для хранения токсичных и радиоактивных отходов. [76] создали реологическую модель поведения горных пород, учитывая ухудшение модуля упругости и прочности в результате эволюции микроструктуры, которая может описывать пластическую деформацию, повреждение, объемную дилатацию и явления ползучести. [75] изучали анизотропное повреждение хрупкой породы и ввели модель тензора повреждений второго порядка для объяснения связанной деформации ползучести. Они предположили, что деформация, зависящая от времени, вызвана деградацией напряжения из-за непрерывного образования микротрещин. Основываясь на механике повреждений, [91] предложил новую конститутивную модель повреждения при ползучести для каменной соли. Внутренний переменный фактор повреждения и соответствующая ему реологическая деформация были использованы для анализа макрохарактеристик континуального повреждения каменной соли при ползучести. [102] исследовали зависящее от времени поведение диабазы с помощью нелинейной модели ползучести путем интеграции мгновенного упругого тела Гука, вязкоупругого тела Шимана и нелинейного вязкопластичного тела в последовательном режиме. На основе обобщенного критерия Хука-Брауна [61] описали трехмерную определяющую модель повреждения при ползучести, которая позволяет рассчитать как три фазы ползучести, так и деформацию, вызванную порочным повреждением и пластической деформацией. Учитывая реологический элемент, [103] создали статистическую определяющую модель ползучести с девятью параметрами модели, все из которых были основаны на модели Nishihara, для анализа деформации ползучести теплого ледяного мерзлого песка. Основываясь на теории внутренних переменных, [106] разработали модель ползучести с повреждениями, которая может предпочтительно описывать закон ползучести и термодинамические свойства. Реологическая модель, учитывающая вязкоупругий и вязкопластический вклады в ползучесть горных пород, была создана [81]. Модель также учитывала эффекты третичной ползучести, включая постепенное механическое повреждение, в котором доминируют накопленные вязкопластические деформации. Для описания зависящих от времени механических свойств породы в процессе ползучести, [99] предложили новый метод построения модели ползучести на основе дробных производных переменного порядка. Порядок дробной производной рассматривается как функция времени, а не как постоянная произвольного порядка. [92] исследовали свойства ползучести соляной породы, подверженной низкочастотной циклической нагрузке, и построили модель повреждения при ползучести для соляной породы на основе модели Бюргерса. Принимая во внимание повреждения и зависящие от времени характеристики

предела текучести породы, [19] предложили зависящую от времени модель разрушения мрамора, основанную на теории дробного исчисления и переменных повреждений.

На этапе ускорения ползучести вышеупомянутые исследования показали, что возникают повреждения, внутри пород. В целом, исследования реологических моделей горных пород достигли большого прогресса и представили много интересных выводов. Более того, эти исследования значительно продвигают нелинейную реологическую теорию горных пород, вводя концепцию механики повреждений. Однако при применении полученных результатов необходимо решить несколько проблем. Например, из-за повреждений, происходящих внутри горных пород, фактическое напряжение на стадии ускорения постепенно увеличивается; однако в действительности при ползучести деформация увеличивается, но напряжение остается постоянным во времени. Поэтому ускоряющаяся ползучесть не описывает точно ползучесть, определяемую обычным способом. На стадии ускоряющейся ползучести появляются нелинейные характеристики ускорения, внутренняя причина этого остается неясной. Поэтому для решения этих вопросов, на которые нет ответов, нелинейная модель ползучести остается актуальной для исследования реологии горных пород как в настоящее время, так и в будущих исследованиях.

1.5.2 Микроструктурная конститутивная модель: Модель Гёнтера/Зальцера

В этом разделе одна из микроструктурных моделей представлена более подробно. Эта конститутивная модель была разработана на основе физических процессов, происходящих на микроскопическом уровне; [38]. Соответственно, три фазы ползучести описываются в рамках одного уравнения. Эта модель основана на макроскопически-феноменологическом описании конкуренции между деформационным упрочнением и восстановлением, как это описано в теории деформационного упрочнения [65]. На рисунке 3 представлены типичные кривые ползучести, полученные с помощью модели Гёнтера/Зальцера.

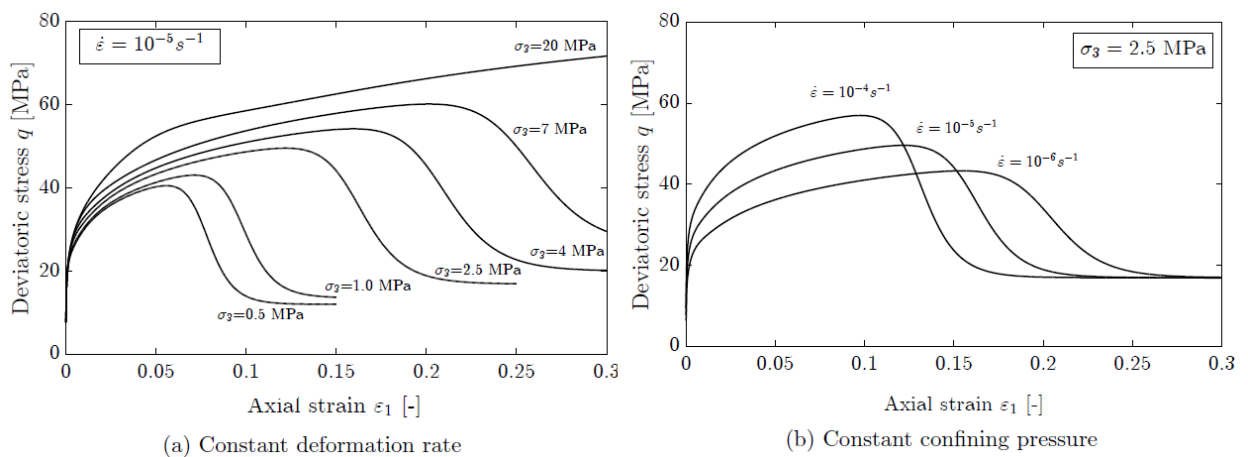


Рисунок 3 – Моделирование трехосных испытаний с использованием модели Гёнтера/Зальцера

Макроскопическая ползучесть обусловлена в первую очередь движением внутрикристаллических решеточных дислокаций, подвижность которых зависит от плотности дислокаций. Кроме того, деформация приводит к образованию дополнительных дислокаций. Следовательно, процесс упрочнения материала может быть эффективно описан с использованием ползучести в качестве основного механизма. Соответственно, общая скорость ползучести выражается как сумма компонента упрочнения, $\dot{\epsilon}_{cr}^V$, и компонента восстановления, $\dot{\epsilon}_{cr}^E$, [71] (1).

$$\dot{\epsilon}_{cr} = \dot{\epsilon}_{cr}^V + \dot{\epsilon}_{cr}^E, \quad (1)$$

Общая скорость ползучести задается как функция эффективного напряжения σ_{eff} и переменной упрочнения ϵ_{cr}^V (2),

$$\dot{\epsilon}_{cr}(\sigma_{eff}, \epsilon_{cr}^V) = A^{(p)} \frac{\sigma_{eff}^\beta}{(\epsilon_0^V + \epsilon_{cr}^V)^\mu}, \quad (2)$$

где $A^{(p)}$, β и μ обозначают параметры материала, ϵ_0^V - начальное значение упрочнения. В целях последовательности выражение σ_{eff}^β в дальнейшем будет означать $(\sigma_{eff}/\sigma_{norm})^\beta$.

Процессу упрочнения может противостоять процесс удаления дислокаций, который можно назвать восстановлением. Скорость восстановления увеличивается с ростом плотности дислокаций и, учитывая, что это термически активированный процесс, с ростом температуры. Поэтому предполагается, что скорость восстановительной ползучести подчиняется двухкомпонентному степенному закону (3).

$$\dot{\epsilon}_{cr}^E = A_1^{(s)} \exp\left\{\frac{-Q_1}{RT}\right\} \sigma_{eff}^{n_1} + A_2^{(s)} \exp\left\{\frac{-Q_2}{RT}\right\} \sigma_{eff}^{n_2}, \quad (3)$$

где $A_{1,2}^{(s)}$, $n_{1,2}$ и $Q_{1,2}$ - параметры материала. Для более точной адаптации температурной зависимости допускаются два различных механизма ползучести, характеризующиеся разными энергиями активации Q_1 и Q_2 . Чтобы получить уравнение (формула 4) для упрочнения, необходимо объединить выражения (1) и (2).

$$\dot{\epsilon}_{cr}^V = A^{(p)} \frac{\sigma_{eff}^\beta}{(\epsilon_0^V + \epsilon_{cr}^V)^\mu} - \dot{\epsilon}_{cr}^E, \quad (4)$$

В соответствии с данными, представленными в уравнении (3), по мере увеличения степени упрочнения первый член будет уменьшаться и приближаться к скорости восстановления. Следовательно, скорость упрочнения будет приближаться к нулю, что сделает деформацию упрочнения постоянной. Таким образом, общая скорость ползучести теперь эквивалентна скорости восстановления и поэтому постоянна, что свидетельствует о переходе материала во вторую фазу ползучести.

С микроструктурной точки зрения уравнение (4) можно интерпретировать как конкуренцию между образованием дислокаций в результате общей ползучести (первый член в правой части) и их аннигиляцией в результате восстановления (второй член), при этом общий баланс определяет скорость упрочнения $\dot{\epsilon}_{cr}^V$.

В контексте напряжений, превышающих границу дилатансии, появляется третья компонента ползучести, $\dot{\epsilon}_{cr}^S$, как средство описания повреждений и дилатансии. В результате уравнение (4) приобретает вид (5):

$$\dot{\epsilon}_{cr}^V = A^{(p)} \frac{\sigma_{eff}^\beta}{(\epsilon_0^V + \epsilon_{cr}^V)^\mu} - \dot{\epsilon}_{cr}^E - \dot{\epsilon}_{cr}^S, \quad (5)$$

Кроме того, деформационное упрочнение снижается за счет смягчения повреждений. В исследованиях [37,36] было показано, что скорость повреждения может быть эффективно аппроксимирована скоростью дилатансии (vol), измеренной при испытаниях на трехосную прочность. Когда правая часть этого уравнения становится отрицательной, начинается третичная ползучесть и, как следствие, автоматически происходит разрушение. Необходимость в специальной формулировке прочности материала отпадает. Определение прочности материала и остаточной прочности зависит от скорости упрочнения, а точнее, от вязкости закона ползучести, зависящей от упрочнения.

1.6 Выводы по Главе 1

Исследование соляных пород как геоматериала и анализ их механического поведения представляют собой важную область геомеханики и геотехнических наук. Проведенный анализ в рамках данной работы охватывает широкий спектр аспектов, начиная от микроструктурных особенностей соляных пород и их сравнения с аналогичными по генезису породами до изучения механического поведения солей при различных условиях, таких как температурное воздействие и скорость деформации. Рассмотрение макроструктурного моделирования механического поведения солей, а также существующих моделей и разработка новых подходов, таких как нелинейная модель разрушения при ползучести и микроструктурная конститутивная модель Гёнтнера/Зальцера, подчеркивают сложность и многообразие процессов, определяющих свойства и поведение соляных пород.

Анализ микроструктурных особенностей соляных пород показал, что структура кристаллов и текстуры осадения играют ключевую роль в их механическом поведении. Сравнение с аналогичными по генезису породами, такими как карбонаты, позволило выделить уникальные особенности солей, включая их высокую пластичность и способность к значительным деформациям без разрушения, а также склонность к длительному деформированию. Исследование механического поведения солей при различных условиях

выявило, что каменная соль демонстрирует специфические характеристики как при кратковременных, так и при длительных испытаниях. Влияние температурного воздействия и вектора напряжений на механическое поведение соли, а также зависимость механических свойств от скорости деформации и нагружения являются важными факторами, которые необходимо учитывать при разработке моделей поведения соляных пород.

Анализ существующих подходов к генерации поликристаллических структур показал, что применение метода Вороного для моделирования поликристаллической структуры каменной соли позволяет более точно предсказать ее поведение в условиях высоких давлений и температур, а также при механических нагрузках. Несмотря на определенные ограничения метода Вороного, такие как невозможность моделирования динамических процессов или сложных форм зерен, его сочетание с другими методами, такими как фазовое поле или методы Монте-Карло, может существенно расширить его возможности. В будущем развитие методов генерации микроструктур, учитывающих дефекты и включения, а также динамическую эволюцию зеренных границ, позволит еще более точно моделировать поведение поликристаллических материалов, таких как каменная соль, в реальных условиях эксплуатации.

В результате анализа современных теоретических и прикладных подходов к моделированию механического поведения соляных пород установлено, что несмотря на наличие значительного числа исследований в области физико-механических свойств соли, её деформирования и разрушения в различных условиях, большинство существующих моделей основано на допущении о сплошной, однородной и изотропной структуре материала. Такие модели позволяют эффективно описывать обобщённый отклик массива, однако в недостаточной степени учитывают влияние внутренней структуры породы, в том числе поликристаллическое строение, наличие слабых контактов, вариабельность свойств между зёрнами и межзеренными зонами.

Выполненный обзор показывает, что основное внимание в современной геомеханике уделяется континуальным моделям, в которых разрушение описывается через пластические зоны, зоны повреждений или смягчённые критерии прочности. Вместе с тем в инженерной практике и лабораторных исследованиях неоднократно фиксировались случаи, когда разрушение происходило локально вдоль границ зёрен с формированием дискретных трещин, отслоений и последующего смещения фрагментов породы. Эти процессы не могут быть достоверно описаны в рамках классической механики сплошной среды без введения эмпирических или эвристических параметров.

На основании проведённого анализа научной и технической литературы можно сделать обоснованный вывод о том, что подходы к моделированию соляных пород, основанные на явном представлении её макроструктуры, до настоящего времени находятся в стадии формирования.

Работы, в которых соль моделируется как поликристаллическая дискретно взаимодействующая среда, единичны и, как правило, касаются отдельных аспектов разрушения или ограничены лабораторными масштабами. Вопросы построения структурных моделей, генерации реалистичной поликристаллической геометрии, реализации контактных взаимодействий, разрушения межзеренных связей и дилатансии остаются недостаточно проработанными.

Таким образом, необходимость в разработке моделей, учитывающих внутреннюю структуру соляных пород в явном виде, представляется актуальной как с теоретической, так и с прикладной точки зрения. Это особенно важно в условиях, когда требуется прогнозировать поведение массива при воздействии локальных концентраторов напряжений — таких как выработки, скважины, стволы или камеры хранения. Учет макроструктуры позволяет повысить точность моделирования, выявить реальные механизмы разрушения и заложить основу для построения более надёжных инженерных решений.

ГЛАВА 2 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ СОЛЯНЫХ ПОРОД И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА ТЕССЕЛЯЦИИ ВОРОНОВА

На сегодняшний день множество современных исследователей склоняются к утверждению о том, что процесс деформирования и разрушения практически любого материала зависит от макроструктуры этого материала. Моделирование процесса деформирования и разрушения солей с учетом их макроструктуры в явном виде является актуальной задачей современной геомеханики. Настоящее диссертационное исследование предполагает формирование подхода к формированию синтетической модели прогноза НДС соляных пород, основанной на макроструктурном представлении такого типа пород с целью изучения их свойств и развития теории в области механики повреждений.

Общий алгоритм построения макроструктурных численных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния соляных состоит из двух основных блоков (рисунок 4): изучение макроструктуры материала; определение механических характеристик базовых элементов составляющих изучаемый материал; построение численной модели и корректировка параметров элементов численной модели на основании сравнения с результатами базовых лабораторных исследований прочности и деформируемости материала.



Рисунок 4 – Алгоритм подготовки синтетической модели прогноза НДС соляных пород
(составлено автором)

В данной главе рассмотрим блоки, посвященные изучению макроструктурных особенностей соляных пород и лабораторных исследований их прочности и деформируемости.

2.1 Изучение макроструктуры соляных пород

Соляные породы являются важной группой осадочных горных пород, образованных в результате процессов испарения и последующей кристаллизации солевых растворов в древних морских и континентальных бассейнах. Эти породы широко распространены в земной коре и играют существенную роль как в геологических исследованиях, так и в различных отраслях промышленности, включая добычу полезных ископаемых и энергетических ресурсов.

Структура соляных пород характеризуется преобладанием кристаллических минералов [104], формирование которых обусловлено различными геохимическими и физико-химическими условиями. Основной минеральный состав этих пород включает галит (NaCl), являющийся основным компонентом каменной соли и обладающий кубической кристаллической решеткой. Галит известен своей высокой симметрией и характерной кубической формой кристаллов, где каждый ион натрия окружен шестью ионами хлора, формируя координационный октаэдр. Другими важными минералами, составляющими соляные породы, являются сильвин (KCl), который также кристаллизуется в кубической системе, но с ионами калия и хлора, что придает ему отличительные физические свойства, включая горько-соленый вкус и повышенную прозрачность. Карналлит ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) имеет моноклинную кристаллическую структуру и содержит значительное количество воды в своей решетке, что влияет на его физико-химические свойства. Гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и ангидрит (CaSO_4) являются сульфатами кальция и часто сопутствуют соляным отложениям, образуя слоистые структуры и способствуя формированию таблитчатых или игольчатых кристаллов.

Типы соляных пород классифицируются на основе их преобладающего минерального состава и условий формирования [58]. Хлоридные породы состоят преимущественно из галита и сильвина, сульфатные породы включают гипс и ангидрит, а карбонатные породы содержат доломит и известняк, связанные с соляными отложениями. Комплексные породы представляют собой сочетание хлоридов, сульфатов и других минералов, отражая сложные геохимические условия их образования.

В дальнейшем мы сосредоточимся на каменной соли, или галите (NaCl), которая является наиболее распространенным и экономически значимым видом соляных пород. Каменная соль образует обширные залежи и пласты, часто достигающие значительной толщины и простирающиеся на большие площади.

Структура каменной соли характеризуется высокой степенью кристалличности и простотой кристаллической решетки [105]. Галит кристаллизуется в кубической системе, где каждый ион натрия окружен шестью ионами хлора и наоборот, формируя координационный октаэдр. Такая симметричная и стабильная структура обуславливает характерные физические свойства галита: высокую растворимость в воде, прозрачность, совершенную спайность по кубу и кубическую форму кристаллов.

Размеры и формы зерен в соляных породах зависят от множества факторов, включая скорость кристаллизации, концентрацию солей в растворе, температуру, давление и наличие примесей [59]. Медленная кристаллизация в стабильных условиях способствует образованию крупных и хорошо оформленных кристаллов, тогда как быстрая кристаллизация приводит к формированию мелких и часто неправильно сформированных зерен. Химический состав раствора играет ключевую роль: высокая концентрация солей способствует быстрому росту кристаллов, а наличие дополнительных ионов и молекул может изменять параметры кристаллизации и влиять на морфологию кристаллов [55]. Размеры и формы зерен каменной соли зависят от условий ее образования и последующих геологических процессов. В медленно испаряющихся бассейнах, где процессы кристаллизации протекают постепенно, формируются крупные и хорошо оформленные кристаллы галита. В условиях быстрого испарения или при наличии турбулентных процессов образуются мелкие и часто неправильно сформированные зерна. Кроме того, последующие деформационные процессы, такие как тектонические движения, могут приводить к перекристаллизации галита и изменению размеров и форм его зерен.

Физические условия среды, такие как давление и температура, существенно влияют на растворимость минералов и скорость их кристаллизации. В условиях повышенного давления и температуры, характерных для глубинных частей земной коры, могут образовываться более сложные структуры и сочетания минералов [39]. Наличие примесей и биологических факторов, включая деятельность микроорганизмов, также может оказывать влияние на процессы кристаллизации, способствуя осаждению определенных минералов или изменяя химический состав растворов.

Изучение соляных пород имеет значительное практическое значение. Соляные купола и пласты часто служат ловушками для углеводородов, что делает их важными объектами при разведке и добыче нефти и газа. Кроме того, соляные породы являются источником различных полезных ископаемых, включая натрий, калий, магний и кальций, которые широко используются в химической промышленности, сельском хозяйстве и медицине.

Для более глубокого понимания структуры, свойств и процессов формирования соляных пород рекомендуется обратиться к фундаментальным научным работам в этой области. Например, монография [95] предоставляет подробный анализ геологии испарительных

отложений, включая минералогию, геохимию и их экономическую значимость. Также классическим трудом является книга [69], где рассматриваются широкие аспекты осадочных пород, включая соляные.

Таким образом, соляные породы представляют собой сложные и разнообразные геологические образования, структура и свойства которых обусловлены множеством факторов. Понимание их минерального состава, типов кристаллических решеток, размеров и форм зерен, а также условий окружающей среды во время их формирования является ключевым для развития геологии, минералогии и связанных с ними отраслей промышленности.

2.1.1 Факторы, определяющие механическое поведение соляных пород

Механическое поведение соляных пород, особенно каменной соли (галита) играет важную роль в геологии и инженерных науках. Понимание факторов, определяющих механические свойства этих пород, необходимо для прогнозирования их реакции на внешние нагрузки, что критично при строительстве подземных хранилищ, шахт и других сооружений. Проведем небольшой анализ научных публикаций для выявления ключевых факторов.

Так, в исследовании [84] авторы изучают динамическую рекристаллизацию влажного синтетического поликристаллического галита и ее зависимость от размера зерен. Они показывают, что уменьшение размера зерен приводит к повышению прочности и изменению реологических свойств соли, что имеет прямое влияние на механическое поведение соляных пород в геологических условиях. В работе [87] исследуется влияние воды на ползучесть каменной соли и, в частности, как присутствие воды и размер зерен влияют на механическое ослабление соли. Авторы обнаружили, что мелкозернистая структура и наличие воды способствуют ускоренной ползучести, что имеет последствия для долговременной стабильности соляных структур.

Исследование [68] посвящено влиянию кристаллопластической деформации на развитие дилатансии и проницаемости в синтетической соляной породе. Авторы анализируют, как форма и размер кристаллов влияют на механизмы деформации и, следовательно, на механическое поведение каменной соли под нагрузкой.

В фундаментальной работе [16] исследуются механизмы ползучести каменной соли, включая влияние размеров зерен и микроструктурных особенностей на ее реологические свойства. Авторы предоставляют подробный анализ того, как микроструктура, включая размер и форму кристаллов, влияет на ползучесть и общее механическое поведение соли. В работе [110] рассматривается уплотнение гранулярного галита посредством прессового растворения при комнатной температуре и влияние влажности на этот процесс. Авторы обсуждают, как размер и форма зерен влияют на механизмы уплотнения и, следовательно, на механические свойства соли.

Книга [77] посвящена микрофизическим механизмам течения каменной соли в природных условиях. Авторы уделяют особое внимание роли микроструктуры, включая размер и форму кристаллов, в определении реологических свойств соляных пород.

В статье [42] исследуется структура границ зерен в галите, деформированном при гидростатических условиях. Авторы анализируют, как микроструктурные особенности, включая форму и размер зерен, влияют на механические свойства и поведение соли под давлением. В работе [96] авторы исследуют анизотропию скорости и затухания продольных волн в каменной соли и связывают эти свойства с микроструктурой породы, включая размер и ориентацию кристаллов.

Таким образом, среди ключевых факторов, влияющих на механическое поведение каменной соли, выделяются форма кристаллов, размер кристаллов и распределение размеров и форм в структуре породы.

Форма кристаллов существенно влияет на механические свойства каменной соли. В идеальных условиях галит кристаллизуется в форме правильных кубических кристаллов. Однако в природных условиях кристаллы могут подвергаться деформациям из-за тектонических процессов, изменений температуры и давления. Анизотропия формы кристаллов приводит к различной ориентации зерен в массиве породы, что, в свою очередь, влияет на ее механические характеристики, такие как прочность и пластичность. Например, вытянутые или неправильно сформированные кристаллы могут способствовать увеличению пластичности породы, поскольку они легче смещаются относительно друг друга при приложении нагрузки.

Размер кристаллов является еще одним важным фактором, определяющим механическое поведение соляных пород. Мелкозернистые породы обычно обладают более высокой прочностью и меньшей склонностью к пластическим деформациям по сравнению с крупнозернистыми аналогами. Это связано с тем, что в мелкозернистой структуре присутствует больше границ зерен, которые препятствуют движению дислокаций и распространению трещин. В результате порода становится более устойчивой к механическим воздействиям. С другой стороны, крупнозернистые породы могут демонстрировать повышенную пластичность и склонность к ползучести, что важно учитывать при длительных нагрузках.

Распределение размеров и форм кристаллов внутри породы оказывает комплексное влияние на ее механические свойства. Гетерогенная структура с различными размерами и формами зерен может приводить к концентрации напряжений в определенных зонах, способствуя возникновению микротрещин и локальных деформаций. Однородное распределение размеров и форм кристаллов способствует равномерному распределению напряжений, повышая общую прочность и устойчивость породы. Кроме того, взаимодействие между зернами

различного размера и формы может влиять на механизмы деформации, такие как скольжение по границам зерен или дислокационная ползучесть.

Исследования в области механического поведения каменной соли подтверждают значимость указанных факторов. Например, работы Йоса Урая и Кристофера Спирса посвящены изучению влияния микроструктуры соляных пород на их реологические свойства. Они показали, что изменения в размере и форме кристаллов, а также в их распределении, могут существенно влиять на процессы деформации и ползучести каменной соли. Важно отметить, что помимо указанных факторов, на механическое поведение соляных пород влияют и другие условия, включая наличие примесей, температуру, давление и влажность. Однако форма и размер кристаллов, а также их распределение являются фундаментальными свойствами, определяющими базовые механические характеристики породы.

Понимание влияния формы кристаллов, размера кристаллов и их распределения в структуре каменной соли является критичным для прогнозирования ее механического поведения. Это знание позволяет разработчикам и инженерам принимать обоснованные решения при проектировании и эксплуатации подземных сооружений, обеспечивая безопасность и эффективность работ. Дальнейшие исследования в этой области будут способствовать улучшению моделей деформации соляных пород и расширению наших знаний о их механических свойствах.

2.1.2 Описание методики генерации синтетической поликристаллической структуры каменной соли

Формирование синтетической модели материала поликристаллической структуры условно делится на два этапа: анализ структуры по заданным факторам и подбор параметров модели. Предложенная методика реализуется через следующий алгоритм.

На первом этапе выбирается высококачественное изображение среза или шлифа образца каменной соли, на котором должно быть представлено характерное скопление кристаллов (не менее 50 штук для статистической значимости). Изображение должно обладать высоким разрешением и контрастностью для последующей обработки.

На втором этапе выполняется автоматизированное выделение границ между кристаллами методом Кэнни. Для этого изображение преобразуется в оттенки серого, затем сглаживается Гауссовским фильтром для подавления шума. Далее вычисляются градиенты яркости для обнаружения резких переходов — потенциальных границ зерен. Алгоритм Кэнни применяется с заданными верхним и нижним порогами, что позволяет выделить сильные и слабые границы с использованием подавления немаксимумов и гистерезиса. Результатом становится бинарное изображение, где границы кристаллов отмечены белым на черном фоне.

Третий этап включает автоматизированное определение размеров и формы зерен. Сначала выполняется морфологическая обработка: заполнение областей и удаление мелких объектов для улучшения сегментации. Затем с помощью маркировки областей идентифицируются отдельные зерна. Для каждого кристалла рассчитываются периметр и площадь, на основе которых определяются эквивалентный диаметр (диаметр окружности, равной по площади сегментированному многоугольнику) и округлость (отношение периметра кристалла к длине окружности эквивалентного диаметра). Эти параметры позволяют количественно описать морфологию структуры.

На четвертом этапе производится выбор модели распределения: Функция Вейбулла часто используется для моделирования распределения размеров зерен. Для проведения статистического анализ был сформирован скрипт для обработки полученных параметров площади и периметра сегментов.

Этот скрипт предназначен для выполнения комплексного анализа данных, характеризующих геометрические параметры объектов, такие как эквивалентный диаметр и округлость. Его основной задачей является не только вычисление базовых статистических характеристик, но и сравнение эмпирического распределения данных с теоретическими распределениями, такими как распределение Вейбулла и нормальное распределение, а также наглядное представление результатов анализа.

На первом этапе скрипт принимает на вход данные, представленные в виде списка, где каждая пара значений соответствует диаметру и округлости отдельного объекта. Эти данные преобразуются в таблицу с помощью библиотеки **pandas**, что упрощает их обработку и анализ. Далее скрипт выполняет расчёт основных статистических характеристик для двух параметров: эквивалентного диаметра и округлости. Среднее значение позволяет определить центральную тенденцию данных, а стандартное отклонение показывает степень их разброса.

На следующем этапе скрипт использует библиотеку **scipy.stats** для подбора параметров распределения Вейбулла [53]. Это распределение часто применяется для описания физических характеристик, связанных с размерами объектов, и характеризуется двумя ключевыми параметрами: параметром формы k , который определяет форму кривой, и параметром масштаба λ , который задаёт её растяжение. Эти параметры оцениваются с помощью функции `weibull_min.fit`. Для сравнения также учитывается нормальное распределение, параметры которого — среднее значение и стандартное отклонение — извлекаются из уже рассчитанных статистик.

После математической обработки результатов скрипт формирует таблицу с ключевыми параметрами анализа. В этой таблице содержатся: среднее значение, стандартное отклонение, параметры распределения Вейбулла (параметры формы и масштаба) для эквивалентного

диаметра и округлости. Таблица создаётся с использованием **pandas** и может быть выведена в консоль или сохранена в файл для последующего анализа.

Для визуализации данных строятся гистограммы, которые позволяют наглядно представить распределение данных. На гистограммы накладываются кривые плотности вероятности, соответствующие распределению Вейбулла и нормальному распределению. Это делается с использованием функций `weibull_min.pdf` и `norm.pdf`. Графики строятся с помощью библиотеки **matplotlib**, причём гистограммы для диаметра и округлости отображаются на отдельных подграфиках, чтобы облегчить их сравнение.

В результате работы скрипта пользователь получает как числовую, так и графическую информацию, которая позволяет получить полное представление о данных. Числовые результаты дают возможность оценить основные характеристики распределений, а графики наглядно демонстрируют соответствие эмпирического распределения теоретическим моделям. Скрипт может быть легко адаптирован для анализа новых данных, достаточно заменить входной массив данных. Это делает его универсальным инструментом для обработки и анализа геометрических характеристик объектов. Полученные результаты имеют следующий вид (рисунок 5).

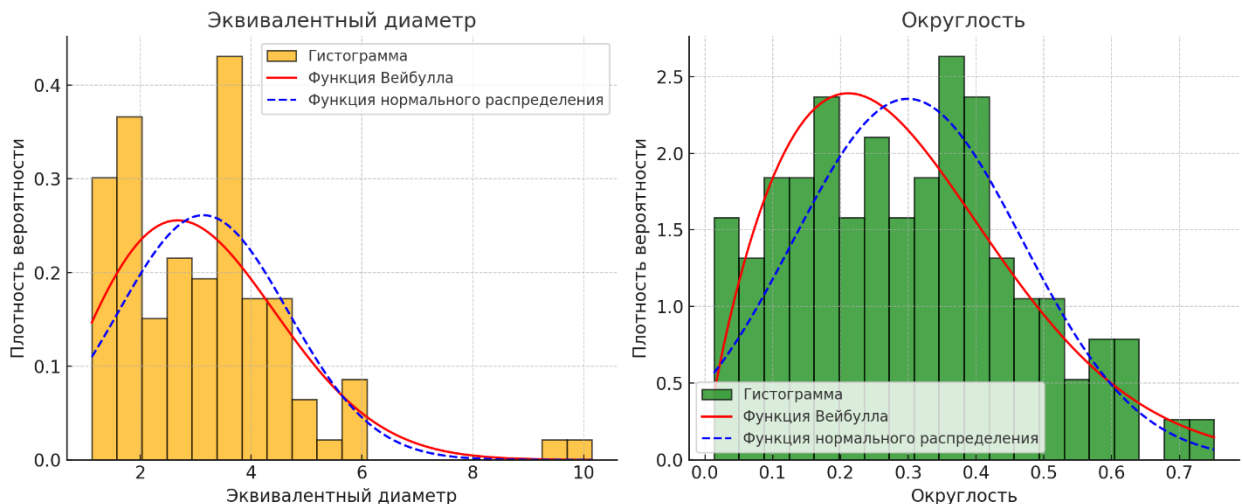


Рисунок 5 – Пример выходных данных скрипта (составлено автором)

Таким образом, методика сочетает визуальный анализ, алгоритмы обработки изображений и математические расчеты для создания синтетической модели, соответствующей реальной поликристаллической структуре материала.

2.1.3 Подбор параметров функции распределения Вейбулла для описания формы и размеров кристаллов

Подбор параметров функции распределения Вейбулла в библиотеке **scipy.stats** выполняется методом максимального правдоподобия (**Maximum Likelihood Estimation, MLE**). Этот метод находит такие параметры распределения, которые максимально вероятны для описания наблюдаемых данных, что явно отражено в формуле (6).

$$f(x; k; \lambda) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

где: $k > 0$ – параметр формы, $\lambda > 0$ – параметр масштаба, $x \geq 0$ – значение случайной величины

Для описания данных используется также функция накопленной вероятности (CDF) (7):

$$F(x; k; \lambda) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}. \quad (7)$$

Процесс подбора параметров можно условно разделить на несколько этапов:

Определение функции правдоподобия: Метод максимального правдоподобия основан на нахождении параметров k и λ , которые максимизируют функцию правдоподобия L , определённую как произведение плотностей вероятностей $f(x)$ для всех наблюдаемых данных x_i (формула 8).

$$L(k; \lambda) = \prod_{i=1}^n f(x_i; k; \lambda). \quad (8)$$

В практике часто используется логарифмическая функция правдоподобия для удобства вычислений (9):

$$l(k; \lambda) = \sum_{i=1}^n \ln(f(x_i; k; \lambda)), \quad (9)$$

что упрощает задачу, так как произведение заменяется суммой.

Оценка параметров: для максимизации функции правдоподобия библиотека `scipy.stats.weibull_min.fit` использует численные методы оптимизации. Эти методы итеративно подбирают значения параметров k и λ , которые максимизируют $l(k; \lambda)$.

Учитываемое смещение: Распределение Вейбулла может включать параметр смещения loc , который определяет начало распределения (значение, с которого начинаются данные). Если задано $loc = 0$ (как в большинстве случаев), распределение начинается с $x = 0$.

Процедура в `scipy.stats`: При вызове функции `weibull_min.fit(data, floc=0)`, `scipy` фиксирует параметр смещения loc на 0 и численно оптимизирует значения k и λ , минимизируя отрицательную логарифмическую функцию правдоподобия $-l(k; \lambda)$.

Возвращаемые параметры: Функция возвращает тройку значений: $(shape, loc, scale)$, где: $shape$ (k) — параметр формы, $scale$ (λ) — параметр масштаба, loc (обычно 0) — параметр смещения.

Метод максимального правдоподобия — это мощный статистический инструмент, позволяющий эффективно оценивать параметры распределения Вейбулла для данных. Используя численные методы оптимизации, `scipy.stats` автоматизирует этот процесс, обеспечивая высокую точность даже для сложных наборов данных.

2.1.4 Генерация синтетической поликристаллической структуры методом тесселяции Вороного

В современной геомеханике возникает потребность в моделировании макроструктуры поликристаллов (совокупность множества зерен) для изучения ее влияния на механические свойства материала. Программа NEPER представляет собой специализированное программное обеспечение для генерации и сеточного представления поликристаллических структур, позволяет создавать синтетические микроструктуры с заданными статистическими свойствами зерен (размер, форма, ориентация и т.д.) и готовить их для последующего численного моделирования. Преимущество подхода состоит в возможности воспроизвести структурные характеристики, близкие к реальному материалу, например распределение размеров зерен, что особенно важно для горных пород (включая соляные породы, такие как галит) с их сложной морфологией. NEPER поддерживает работу с 2D и 3D полигонами и способен эффективно обрабатывать очень большое число зерен.

Генерация поликристаллических структур в Neper строится на основе методов Вороного и лагранжевых диаграмм, которые позволяют делить пространство на ячейки — зерна — в соответствии с определёнными правилами (рисунок 6).



Рисунок 6 – Примеры синтетической поликристаллической микроструктуры, сгенерированной NEPER (составлено автором)

Программа представляет собой набор модулей, каждый из которых отвечает за отдельный этап моделирования. Основными модулями NEPER являются `neper -T`, `neper -S`, `neper -M` и `neper -V`.

Модуль `neper -T` (от англ. tessellation) используется для генерации тесселяции пространства — то есть, деления заданного объема на зерна. Это ядро всей программы, поскольку именно здесь создаётся геометрическая структура, которая в дальнейшем будет использоваться для анализа или численного моделирования. На этом этапе пользователь может задать количество зерен, геометрию образца, а также статистику распределения размеров и форм зерен. Возможность контролировать распределение размеров особенно важна при синтетическом

моделировании, например, соляных пород, где известно, что зерна могут варьироваться от мелких кристаллов до относительно крупных включений. NEPER позволяет использовать нормальное, логнормальное, гамма- и другие распределения для задания размеров зерен. Это значит, что можно воссоздать микроструктуру с высокой степенью приближённости к природным образцам.

Степень влияния параметров округлости и эквивалентного диаметра наглядно отображена на рисунке 7.

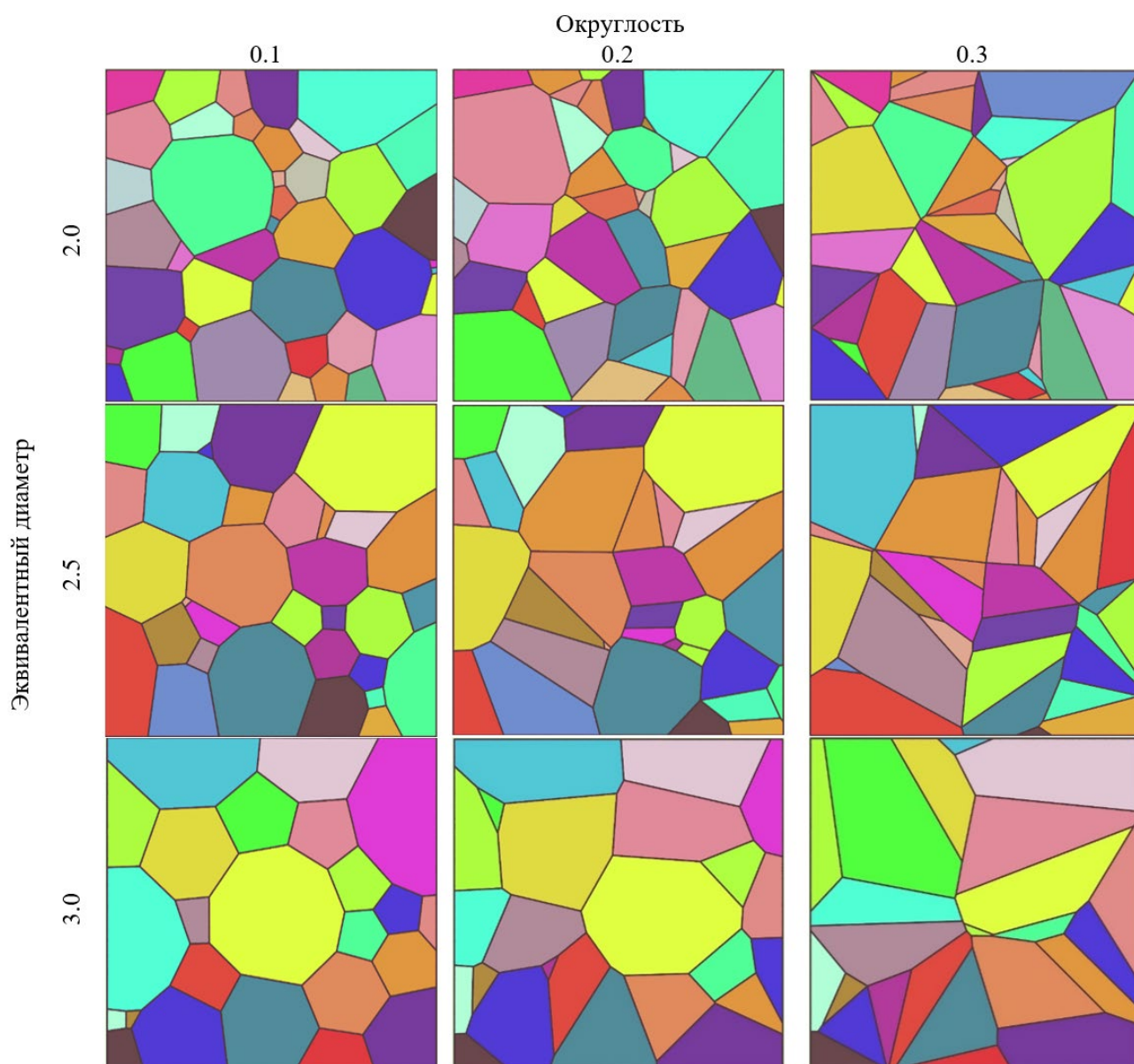


Рисунок 7 – Влияние эквивалентного диаметра и округлости на генерируемую структуру [2]

С увеличением параметра округлости увеличивается соотношение максимального и минимального линейных размеров кристалла, что в свою очередь оказывает влияние на угловатость рассматриваемых частиц.

Кроме размеров зерен, **neper -T** предоставляет возможность задания формы зерен, что осуществляется посредством параметра «аспектного отношения» и так называемой

«эллипсоидной» или «гранулярной» модели формы зерна. В природных материалах, в том числе соляных породах, форма зерен может быть далека от идеального шара — они часто обладают выраженной анизотропией, вытянутостью или уплощённостью. Учитывая это, в NEPER можно задать распределение этих формальных характеристик, что позволяет получать структуры, адекватно отражающие реальную морфологию.

Следует отметить, что морфология синтетической структуры в NEPER формируется двумя основными параметрами, которые характеризуют размер и форму отдельных кристаллов: эквивалентный диаметр (D) – диаметр окружности, площадь которой эквивалентна площади (объему) многоугольника; округлость (C) – отношение периметра (площади поверхности) многоугольника к длине эквивалентной окружности (площади поверхности эквивалентной сферы). Их распределение в выборке и определяет синтетическую макроструктуру (10)

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}},$$

$$C = 1 - \left(\frac{2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{P} \right),$$
(10)

где: A – площадь рассматриваемого кристалла, P – периметр рассматриваемого кристалла.

Модуль **neper -S** используется для задания текстуры материала. Он позволяет задавать ориентации кристаллических осей каждого зерна, что особенно важно при моделировании анизотропных материалов. В случае с соляными породами, где преобладают изотропные свойства на макроуровне, можно задать случайное распределение ориентаций, однако при необходимости моделирования, например, деформационного механизма с учетом преференциальной ориентации, этот модуль становится крайне полезным.

Следующий этап — это дискретизация или генерация сетки, которая выполняется с помощью модуля **neper -M** (от англ. mesh). Здесь создаётся конечная элементная сетка, соответствующая ранее сгенерированной микроструктуре. Для численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ), такой как в программных пакетах Abaqus, Ansys или Code_Aster, необходима качественная сетка, которая корректно аппроксимирует как границы зерен, так и их форму. NEPER позволяет получить высококачественные тетраэдрические сетки, где границы между зёрнами чётко определены, а размер элементов можно адаптировать в зависимости от геометрических особенностей. Важно отметить, что можно варьировать плотность сетки в зависимости от размера зерна — это особенно актуально, если структура содержит широкий спектр размеров кристаллитов.

Модуль **neper -V** используется для визуализации и анализа результатов. С его помощью можно построить трёхмерное изображение структуры, визуализировать ориентации,

распределение размеров, формы и т.д. Это позволяет не только качественно оценить полученную микроструктуру, но и количественно — через вычисление статистик: гистограмм размеров, формы, ориентаций и других параметров.

Огромным преимуществом NEPER является его открытая архитектура и возможность встраивания в автоматизированные пайплайны. Можно, например, сгенерировать десятки или сотни различных структур с варьируемыми параметрами зерен и проанализировать, как изменение распределения размеров или формы влияет на механическое поведение материала. Это особенно важно при работе с геоматериалами, такими как соль, где структура может значительно варьироваться в зависимости от условий отложения и последующей геологической истории.

Соляные породы, в частности галит, часто обладают микроструктурой, представленной в виде сросшихся кристаллов с различной степенью анизотропии. Такая структура определяет поведение породы при ползучести, пластической деформации и других механических процессах. Поскольку экспериментальное изучение всех возможных структур затруднено, применение синтетических моделей (рисунок 8) становится крайне полезным.

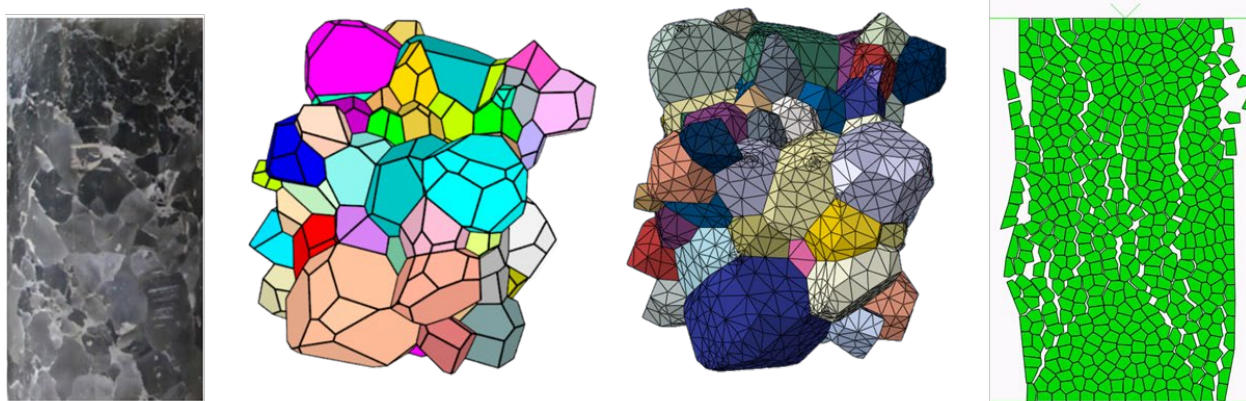


Рисунок 8 – Концепция формирования синтетической модели макроструктуры соли (составлено автором)

Генерация моделей соляных пород с заданными распределениями размеров зерен, формой и ориентацией позволяет исследовать чувствительность макроскопических свойств к микроструктурным особенностям. Например, можно установить, как изменится скорость ползучести при увеличении среднего размера зерна, или как влияет вытянутость зерен на направление распространения трещин.

Таким образом, можно сделать обоснованный вывод: метод генерации синтетических микроструктур с помощью NEPER является мощным и гибким инструментом, позволяющим не только воспроизводить реалистичные модели поликристаллических материалов, но и проводить контролируемые численные эксперименты с варьируемыми параметрами. Возможность задания конкретных распределений размеров и форм зерен делает его особенно ценным для

моделирования геоматериалов, таких как соляные породы. Это открывает путь к более глубокому пониманию механических свойств таких пород и позволяет разрабатывать более точные модели их поведения под нагрузкой, что актуально для геотехнических приложений, подземного хранения, добычи полезных ископаемых и долговременного хранения отходов.

2.2 Лабораторные исследования прочности и деформируемости соляных пород

В лабораторных условиях изучение прочности и деформируемости солей осуществляется посредством классических механических испытаний: одноосного и трёхосного сжатия, испытаний на ползучесть (creep tests), релаксации напряжений и циклических нагрузок. На основе таких испытаний получают параметры, характеризующие поведение породы при различных нагрузках. Однако эти параметры обладают высокой вариативностью и чувствительностью к внешним условиям, таким как температура, влажность, скорость нагружения, геометрия образца.

2.2.1 Особенности механического поведения соляных пород

Наиболее характерными диапазонами прочностных и деформационных характеристик соляных пород принято считать: предел прочности при одноосном сжатии варьируется от 10 до 30 МПа; модуль упругости находится в пределах от 5 до 40 ГПа и может значительно снижаться при длительном нагружении из-за развития ползучести; угол внутреннего трения ϕ , по результатам трёхосных испытаний, колеблется от 20° до 35° ; сцепление (c) изменяется в диапазоне от 0.5 до 3.5 МПа. Эти параметры демонстрируют значительную зависимость от минералогического состава, содержания примесей, кристаллической текстуры и условий испытаний. Например, согласно работам [64], механическое поведение солей определяется как квазивязкопластическое с выраженной нелинейной ползучестью, а исследования [21] показали, что даже при низких напряжениях может наблюдаться длительная деформация, приводящая к перераспределению внутренних напряжений и изменению структуры породы.

Соляным породам присущи следующие особенности деформирования: высокая чувствительность к времени и температуре (в условиях повышенной температуры скорость ползучести возрастает на несколько порядков); наличие межзеренного и внутрикристаллического скольжения как доминирующих механизмов пластической деформации; способность к значительной деформации без разрушения; а также анизотропия механических свойств, связанная с ориентировкой кристаллов NaCl в породе. При этом процессы перекристаллизации, рекристаллизации и миграции границ зёрен играют ключевую роль в формировании зон локализованной деформации, которые могут быть предвестниками разрушения массива. Эти явления подробно описаны, в частности, в работах [17], где подчеркивается важность микроструктурных изменений при длительной нагрузке.

Несмотря на то, что стандартные методы испытаний дают общее представление о механическом поведении соляных пород, они не позволяют раскрыть природу развития деформации и разрушения на микроуровне. Параметры, полученные в лабораторных условиях, усреднены по объему образца и не отражают влияния межкристаллических взаимодействий, текстуры, микротрещин и процессов на границах зёрен. Именно в соляных породах, как ни в каких других, важна детальная оценка микро- и мезомасштабных процессов, таких как скольжение по границам кристаллов, перекристаллизация, миграция зёрен и развитие микротрещин. Для более глубокого понимания этих механизмов необходим переход от традиционных испытаний к исследованию свойств отдельных кристаллов и взаимодействия между ними.

Таким образом, становится очевидным, что полноценное понимание поведения соляных пород невозможно без привлечения макроуровневых подходов, направленных на изучение кристаллической структуры и межкристаллических взаимодействий. Только такой подход способен пролить свет на зарождение и развитие деформационных и разрушительных процессов, обеспечив тем самым основу для более надёжного прогнозирования поведения соляных массивов в инженерных условиях.

2.2.2 Обоснование метода определения прочностных характеристик отдельных кристаллов

Изучение прочностных характеристик отдельных кристаллов является важным направлением в механике твёрдого тела, особенно при анализе пород с выраженной кристаллической структурой, таких как соляные породы. Понимание поведения кристаллов под нагрузкой позволяет не только глубже раскрыть механизмы деформирования на микроструктурном уровне, но и значительно повысить точность прогноза прочностных свойств горных массивов в целом.

Существуют различные экспериментальные методы, позволяющие определять механические характеристики кристаллов: нано- и микротвердометрия, испытания микроскопических образцов на сжатие и растяжение, микроскопия атомных сил (AFM) в режиме контактной механики, а также методы вдавливания с использованием различных инденторов. Нанотвердометрия обеспечивает измерения твердости и модуля Юнга с высокой пространственной точностью, но при этом требует идеальной подготовки поверхности, а также строго контролируемых условий испытания [66]. Испытания микроскопических образцов дают возможность получения диаграмм «напряжение-деформация», однако сложности изготовления и захвата столь малых образцов ограничивают широкое применение данного метода [35].

Одним из наиболее эффективных и технологически доступных подходов к изучению прочностных характеристик кристаллов является метод нагружения сферическими инденторами, предложенный и теоретически обоснованный В.А. Коршуновым [6]. Суть метода заключается в приложении нагрузки к поверхности монокристалла через сферический индентор известного радиуса и измерении параметров отпечатка после снятия нагрузки. Применение индентора сферической формы позволяет формировать в материале трёхосное напряжённое состояние, близкое к тому, которое наблюдается при естественных условиях деформирования в массиве. Данный метод отличается рядом существенных преимуществ. Во-первых, он позволяет определять локальные прочностные характеристики в объеме кристаллической решётки без необходимости извлечения и подготовки изолированных образцов. Это особенно актуально для минералов, обладающих хрупкой или пластичной структурой, таких как галит. Во-вторых, получаемые результаты учитывают влияние конфигурации напряженного состояния, близкого к природному, что делает их более репрезентативными для геомеханического моделирования.

Теоретическое обоснование метода основывается на решении задачи контактного взаимодействия сферического тела с плоской поверхностью упруговязкопластического материала с учётом перехода от упругого к пластическому режиму деформирования. Коршуновым был предложен способ, позволяющий по параметрам отпечатка и приложенной нагрузке определить предельное касательное напряжение и модуль сдвига материала [5, 7]. Это позволяет перейти от поверхностной твердости к объёмным характеристикам прочности, таким как предел текучести, сопротивление сдвигу и другие прочностные параметры.

Практическая реализация метода требует использования прецизионных приборов для фиксации силы вдавливания и точного измерения размеров отпечатка. В современной экспериментальной практике часто применяются оптические и электронные методы визуализации, позволяющие с высокой точностью интерпретировать результаты. В случае соляных пород данный метод позволяет оценить вариации прочностных характеристик в пределах отдельного зерна, а также выявить влияние кристаллографической ориентации, наличия микродефектов и примесей [28].

Таким образом, метод нагружения сферическими инденторами представляет собой эффективный инструмент для определения прочностных характеристик кристаллов. Его применение особенно целесообразно в задачах, связанных с изучением механики деформирования солей, где ключевую роль играют микроструктурные процессы. В сочетании с современными средствами визуализации и микромеханического моделирования данный метод позволяет перейти от макроскопического описания поведения породы к более точному микроуровневому анализу, что существенно расширяет возможности геомеханических исследований.

2.2.3 Программа испытаний

В рамках исследования были отобраны 6 характерных кристаллов галита с Верхнекамского месторождения калийных солей для определения их прочностных характеристик.

В ходе проведения лабораторных испытаний направленных на разрушение кристаллов солей сферическими инденторами определяются прочностные характеристики, такие как: прочность на одноосное сжатие и растяжение, сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент Пуассона. В качестве основы метода выступает оценка предельных напряжений в различных направлениях в момент раскалывания образца, которое происходит в результате сдвига в области неравномерного трехосного сжатия непосредственно под сферическими инденторами (рисунок 9).

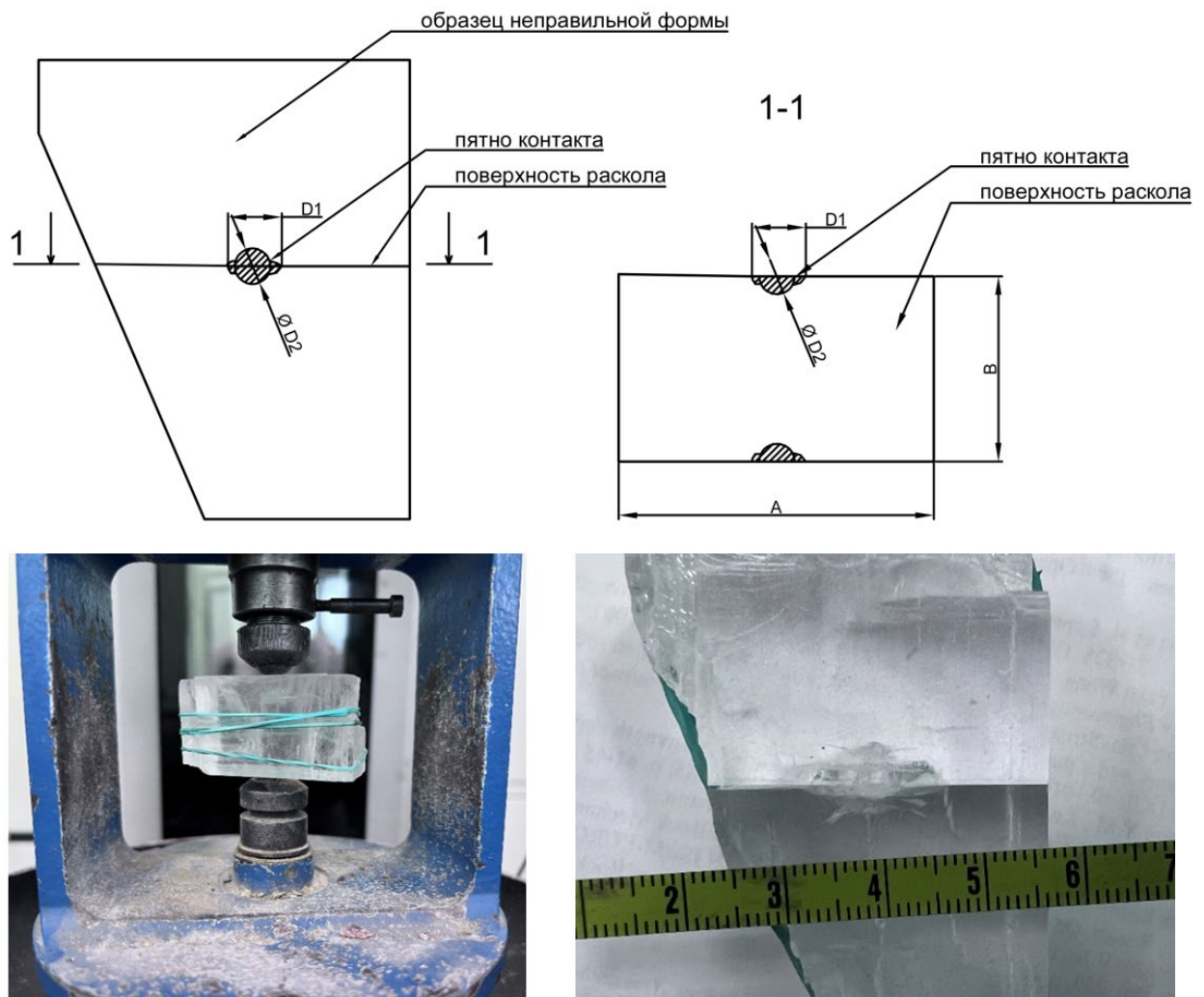


Рисунок 9 – Схема для определения параметров разрушения при испытании сферическими инденторами [2]

По результатам лабораторных исследований механизм деформирования и прочности пород (рисунок 9) определяется максимальным линейным размером зоны трещинообразования в окрестности пятна контакта с инденторами $D1$, диаметром пятна контакта $D2$, шириной зоны

раскола А и высотой зоны раскола В. Напряженное состояние, соответствующее образованию трещины отрыва, оценивается посредством двух показателей: σ_t - минимальные главные нормальные напряжения, которое соответствуют растягивающему напряжению разрыва и p - максимальные главные нормальные напряжения, соответствующие радиальному напряжению на поверхности большей из зон разрушенной породы (11).

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{P}{F}; \\ p &= \frac{P}{S};\end{aligned}\tag{11}$$

где P – разрушающая нагрузка, F – площадь поверхности отрыва; S – площадь поверхности большей из зон разрушенной породы.

Определение прочностных характеристик кристаллов соли выполняется по эмпирическим формулам [6], представленных ниже (Таблица 1).

Таблица 1. Формулы (12) - (17) для определения показателей паспорта прочности [6]

Предел прочности при чистом сдвиге	$\tau_0 = \frac{2\sigma_t p}{p + \sigma_t};$	(12)
Предел прочности при растяжении	$\sigma_p = 2\sigma_t;$	(13)
Предел прочности при одноосном сжатии	$\sigma_{сж} = p + \sqrt{p\sigma_t};$	(14)
Сцепление	$C = \frac{\sqrt[4]{p\sigma_t}(\sqrt{p} + \sqrt{\sigma_t})}{2};$	(15)
Угол внутреннего трения	$tg\varphi = \frac{\sqrt{p} - \sqrt{\sigma_t}}{2\sqrt[4]{p\sigma_t}};$	(16)
Коэффициент Пуассона	$\nu = \frac{2\sigma_t}{p\frac{\pi}{4} - \frac{\sigma_t}{2}};$	(17)

2.2.4 Результаты

На основании полученных и обобщенных результатов экспериментальных исследований был построен паспорт прочности (рисунок 10). Исходя из полученной кривой были определены прочностные характеристики отдельных кристаллов.

Используемый метод испытаний зарекомендовал себя, как перспективный для определения механических характеристик отдельных кристаллов соли и может быть использован в дальнейших исследованиях. Определение размеров разрушенной зоны в окрестности пятен

контакта с инденторами облегчается прозрачностью кристаллов (рисунок 10). А форма разрушения образцов при раскалывании обуславливается правильной формой кристаллической решетки галита. Одним из преимуществ выбранного метода испытаний является возможность повторного использования ненарушенных частей расколотого кристалла, что позволяет расширять выборку по результатам испытаний для получения более достоверных сведений о механических свойствах образцов.

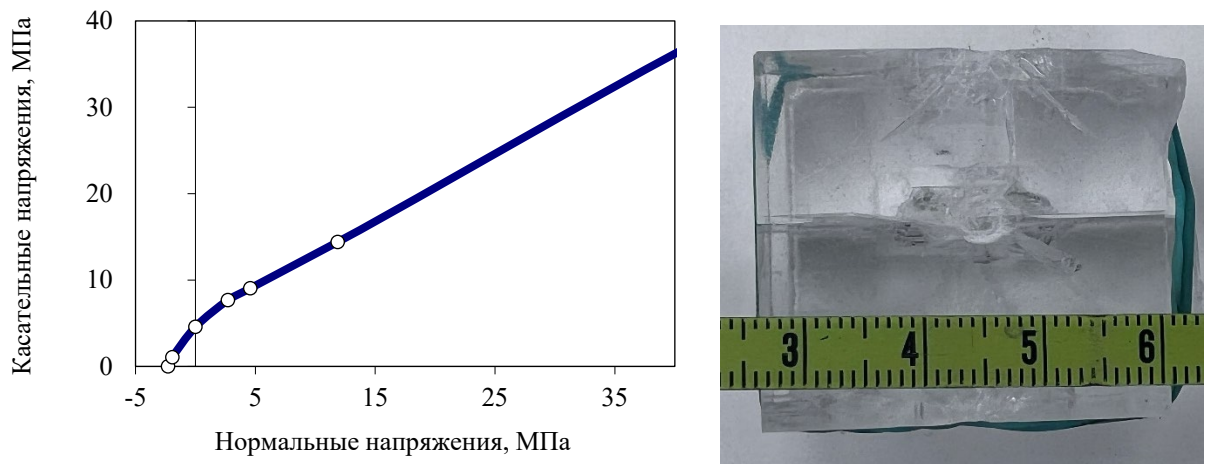


Рисунок 10 – Паспорт прочности кристаллов соли по результатам испытаний [2]

Значение коэффициента вариации при определении искомых величин не превышает 16.2 %. Прочность на сжатие отдельных кристаллов изменяется в промежутке от 19 до 27 МПа, на растяжение – от 1.8 до 2.8 МПа, среднее значение сцепления составило 4.54 МПа, а угла внутреннего трения – 35.2 градуса. Величина коэффициента Пуассона колеблется в пределах от 0.16 до 0.25 со средним значением в 0.19 – полученное значение сопоставимо с бетоном, что говорит о достаточно большой жесткости кристаллов до предела упругости. Результирующие прочностные и деформационные характеристики кристаллов соли сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты испытаний кристаллов соли (составлено автором)

№	Площадь разрыва	Площадь зоны РП	Коэф. Пуассона	Предел прочности при растяжении	Предел прочности при сжатии	Предел прочности при срезе	Условное сцепление при объемном сжатии	Угол внутреннего трения
	$S, \text{см}^2$	$F, \text{см}^2$	ν	$\sigma_{\text{рк}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{с}}, \text{МПа}$	$C_0, \text{МПа}$	$C, \text{МПа}$	$\phi, \text{град}$
1	10.51	0.63	0.16	1.940	21.25	4.19	5.26	37.3
2	10.22	0.66	0.17	1.863	19.26	3.90	4.85	36.5
3	11.19	0.79	0.19	2.809	26.90	5.65	6.94	35.4
4	10.49	0.85	0.22	2.321	19.92	4.41	5.31	33.9
5	4.29	0.39	0.25	2.603	20.37	4.71	5.59	32.5
6	7.17	0.50	0.18	2.147	20.98	4.37	5.38	35.7

Продолжение таблицы 2

Средние значения	0.19	2.281	21.45	4.54	5.56	35.2
Коэффициенты вариации, %	16.20	16.3	12.9	13.4	12.9	5.0

Поскольку галит это минерал однородного строения, и он имеет правильную внутрикристаллическую структуру, полученные показатели могут быть использованы в качестве постоянных значений для моделирования механического поведения отдельных кристаллов в структуре каменной соли. Постоянная величина прочностных характеристик кристаллов позволит подобрать параметры контактного межкристаллического взаимодействия, таким образом, чтобы общий характер деформирования и вследствие - разрушения структуры соли, имел сходство с реальными лабораторными испытаниями.

2.3 Выводы по Главе 2

Глава посвящена лабораторным исследованиям макроструктуры соляных пород и обоснованию параметров алгоритма тесселяции Вороного для генерации синтетических поликристаллических структур, а также экспериментальной оценке прочности и деформируемости соли. Полученные результаты имеют ключевое значение для построения адекватных моделей геомеханических процессов в соляных массивах, особенно с учетом их гетерогенной и анизотропной природы.

В результате анализа макроструктуры соляных пород установлено, что такие параметры, как форма, размер и пространственное распределение кристаллов, существенно влияют на механическое поведение материала. Было выявлено, что распределение зерен в объеме имеет стохастический характер, и традиционные модели, основанные на осреднении свойств, не способны адекватно отражать поведение таких сред в условиях сложных напряжённых состояний. Это подтверждает необходимость применения статистически обоснованных алгоритмов генерации синтетических структур, способных воспроизводить реальное поликристаллическое строение породы.

Для генерации поликристаллической структуры каменной соли был обоснован и применён метод тесселяции Вороного. Его выбор обусловлен возможностью точной репрезентации случайной формы и размеров зерен, а также простотой реализации и высокой гибкостью в параметризации модели. Важным достижением является разработанные алгоритм подбор параметров функции распределения Вейбулла, которая позволяет наиболее достоверно воспроизвести эмпирически наблюдаемую морфологию зерен соли. Таким образом, сформирована основа для статистически репрезентативного моделирования поликристаллических структур, способных обеспечить реалистичное численное описание процессов деформации и разрушения.

В ходе лабораторных испытаний, направленных на определение прочностных и деформационных характеристик, были выделены ключевые особенности поведения соляных пород при различных видах нагружения. Обнаружено, что прочностные параметры отдельных кристаллов существенно варьируются в зависимости от их ориентации и наличия микродефектов. Более того, макроструктура соляных пород оказывает доминирующее влияние на формирование зон концентрации напряжений и механизмов разрушения, включая образование межзеренных трещин и дилатансионные эффекты.

Результаты исследований подтверждают, что учёт макроструктурных характеристик, в том числе геометрических и статистических свойств зерен, является необходимым условием для построения достоверных моделей поведения солей при воздействии внешних нагрузок. Это, в свою очередь, создает научную основу для применения метода конечно-дискретных элементов (МКДЭ) с явным описанием структуры, что значительно повышает точность прогноза напряжённо-деформированного состояния массива.

Таким образом, результаты главы демонстрируют не только необходимость, но и практическую реализуемость перехода от сплошных к структурно-ориентированным моделям, что особенно актуально для геомеханических задач, связанных с проектированием подземных сооружений в соляных массивах.

ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА НДС СОЛЯНЫХ ПОРОД

В условиях растущих требований к безопасности и надёжности подземных сооружений, размещаемых в соляных массивах, всё более актуальной становится задача повышения достоверности прогноза геомеханических процессов. Особенности внутреннего строения соляных пород, их поликристаллическая структура и наличие межзеренных неоднородностей обуславливают необходимость использования численных моделей, способных учитывать эти факторы при расчёте напряжённо-деформированного состояния (НДС). В настоящей работе рассматривается первый этап развития подхода к моделированию поведения соли с учётом её макроструктуры — а именно моделирование механического отклика соляных пород при краткосрочном нагружении. Такой подход позволяет заложить основу для последующего комплексного анализа геомеханических явлений, включая процессы разрушения, и служит базой для более сложных моделей, учитывающих длительные воздействия, термогидродинамические факторы и ползучесть.

В рамках данной главы реализуется подход, основанный на явном представлении структуры соляной породы как совокупности поликристаллов, каждый из которых моделируется сплошными конечными элементами. Границы между кристаллами представлены в виде когезионных элементов, способных воспроизводить межзеренное взаимодействие, в том числе и процессы разрушения по границам кристаллов. Такой подход позволяет моделировать ключевые механизмы, определяющие поведение соли при различных формах нагружения: от межкристаллического скольжения и формирования микротрещин до локализации деформаций и инициирования макроскопических разрушений.

Использование когезионных элементов, внедряемых в расчётную сетку вдоль границ ячеек, полученных методом тесселяции Вороного, даёт возможность с высокой точностью моделировать инициирование и развитие трещин, а также характеризовать прочность и жёсткость межкристаллических связей. Это обеспечивает переход от традиционного сплошного представления материала к гибридной конечно-дискретной модели, в которой реализуется как непрерывная передача напряжений внутри кристаллов, так и дискретные процессы на их границах.

Подобный подход также позволяет учитывать стохастический характер макроструктуры: вариативность размеров и форм кристаллов, их пространственное распределение и ориентировку, а также статистические различия в прочностных свойствах когезионных связей. За счёт этого становится возможным более точно прогнозировать напряжённо-деформированное состояние (НДС) в окрестности подземных выработок, соляных каверн и других объектов, размещённых в пределах соляных массивов.

В настоящей главе подробно рассматривается процесс построения численной модели: от генерации поликристаллической структуры и параметризации когезионных связей до реализации различных моделей разрушения в рамках конечно-дискретного подхода. Также осуществляется количественная оценка вклада макроструктурных факторов в общее механическое поведение соляных пород, что является основой для последующих инженерных решений в области безопасности и устойчивости подземных сооружений.

3.1 Описание подхода к численному моделированию структуры в явном виде

Предлагаемый в данной работе численный подход к моделированию механического поведения соляных пород основан на использовании метода конечно-дискретных элементов (МКДЭ), позволяющего одновременно учитывать как непрерывные, так и дискретные процессы в поликристаллической структуре материала. Основная идея заключается в явном представлении макроструктуры породы в виде совокупности отдельных кристаллов, каждый из которых моделируется с применением сплошных конечных элементов, а взаимодействие между ними описывается через систему когезионных связей (рисунок 11).

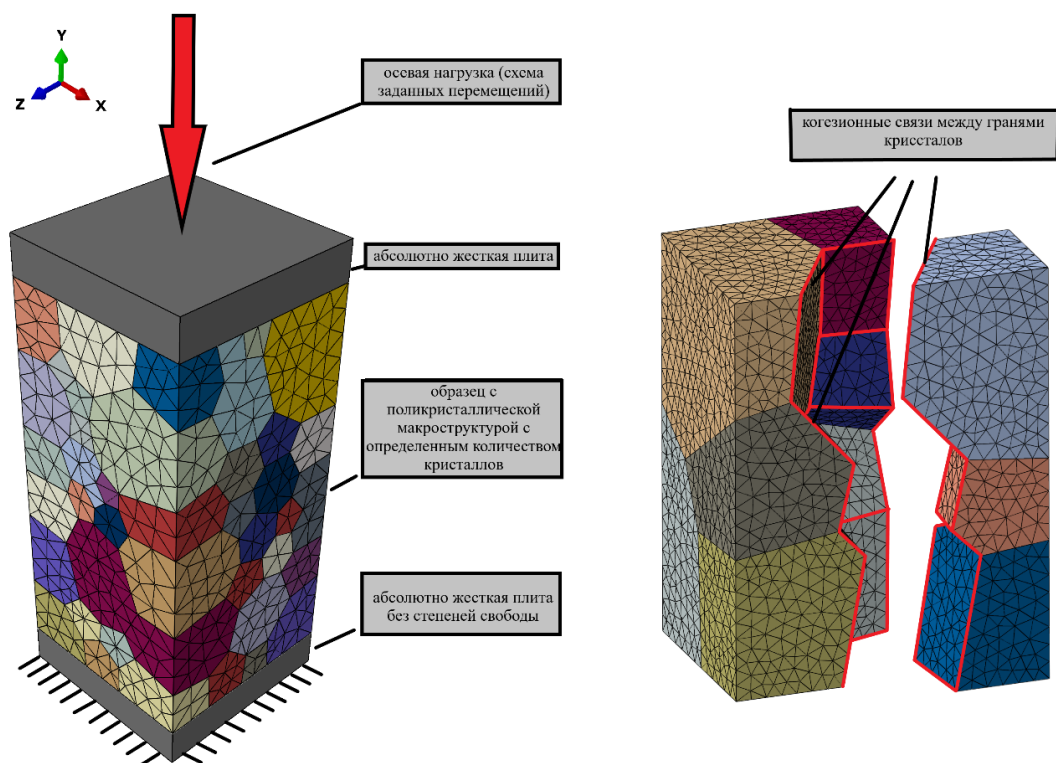


Рисунок 11 – Визуализация подхода к численному моделированию (составлено автором)

Поликристаллическая структура породы генерируется методом тесселяции Вороного, параметры которого подбираются на основе лабораторных данных, полученных в рамках второй главы работы. Это позволяет получить статистически достоверную модель геометрии зерен, отражающую реальные особенности соляных пород, такие как размер, форма и пространственное

распределение кристаллов. Данная структура формируется на этапе подготовки модели и служит геометрическим каркасом для построения конечной элементной модели.

Внутри каждой ячейки, представляющей отдельный кристалл, поведение материала моделируется с использованием классической модели Кулона-Мора. Эта модель, основанная на учёте сцепления и внутреннего трения, позволяет адекватно описывать прочностные характеристики кристаллов соли при краткосрочном нагружении. Она обеспечивает реалистичное воспроизведение условий разрушения отдельных зерен при воздействии на модель внешних нагрузок.

Особое внимание в подходе уделено моделированию границ между кристаллами, которые играют решающую роль в иницировании и развитии повреждений. Эти границы описываются при помощи когезионных элементов, обладающих способностью к накоплению повреждений и последующему разрыву связей. Механизм разрушения в когезионных элементах реализован на основе модели повреждения, что позволяет учитывать нелинейное поведение материала при достижении предельных значений напряжений вплоть до полного разрыва межкуристаллических связей. Таким образом, модель охватывает как процессы зарождения микротрещин, так и их последующее развитие.

Интеграция в рамках МКДЭ сплошных элементов для описания объёмной деформации кристаллов и дискретных когезионных элементов для имитации разрушения по границам между зёрнами обеспечивает уникальное сочетание высокой точности и физической реалистичности. Этот подход позволяет достоверно воспроизводить локализацию деформаций, а также оценивать условия устойчивости и прочности соляных массивов при кратковременном нагружении. Таким образом, предложенная методика закладывает основу для построения прогностических моделей поведения соляных пород в инженерных задачах, связанных с подземным строительством, проектированием хранилищ и оценкой рисков разрушения горных массивов.

3.2 Моделирование контактного взаимодействия между отдельными кристаллами соли

Одним из ключевых аспектов при моделировании поликристаллических материалов, включая соли, является точное описание контактного взаимодействия между отдельными зёрнами или кристаллами. Учитывая высокую степень анизотропии механических свойств и сложный характер разрушения в таких средах, необходим учет как трения, так и когезионных сил между граничащими поверхностями. Эффективным инструментом для такой постановки задачи является использование когезионных элементов, реализуемых в программной среде ABAQUS CAE.

В ABAQUS CAE когезионные элементы (Cohesive Elements) предназначены для моделирования постепенного разрушения связей между телами, таких как трещины, отслоения,

или в рассматриваемом случае — разрывов межзеренных границ. Эти элементы располагаются между основными конечными элементами и обладают собственной механической характеристикой, описываемой определенным законом (Cohesive Behavior), включающим начальную жесткость, прочность сцепления и критические параметры энергии разрушения [9].

Когезионные элементы применяются для соединения двух различных компонентов. Часто при деформации они полностью разрушаются на растяжение и/или сдвиг. В результате компоненты, изначально соединённые когезионными элементами, могут войти в контакт друг с другом. Для моделирования такого взаимодействия используются следующие подходы:

В некоторых случаях контакт можно описать с помощью самих когезионных элементов. По умолчанию они сохраняют сопротивление сжатию даже после полной потери прочности на растяжение и/или сдвиг. Это позволяет им препятствовать проникновению одного компонента в другой, несмотря на разрушение. Такой подход наиболее эффективен, если верхняя и нижняя поверхности когезионного элемента не смещаются по касательной относительно друг друга на значительное расстояние в процессе деформации. Другими словами, для корректного моделирования необходимо, чтобы деформация когезионных элементов ограничивалась "малым скольжением".

Альтернативный подход заключается в предварительном задании контакта между поверхностями окружающих компонентов, которые потенциально могут соприкасаться, с последующим удалением когезионных элементов после их полного разрушения. Таким образом, контакт моделируется на протяжении всей симуляции. Однако этот метод не рекомендуется в случаях, когда геометрическая толщина когезионных элементов в модели очень мала или равна нулю. Это связано с тем, что моделирование контакта может привести к нефизическому сопротивлению сжатию со стороны когезионного слоя, пока элементы ещё активны. При наличии трения также могут возникать нефизические силы сдвига.

Для моделирования контактного взаимодействия кристаллов соли когезионные элементы позволяют учитывать как начальное сцепление между поверхностями, обусловленное межмолекулярными силами и возможными микроскопическими зацеплениями, так и постепенное разрушение этих связей под действием механической нагрузки. В ABAQUS применяется подход, основанный на «traction-separation» законе, при котором нормальные и тангенциальные напряжения на когезионной поверхности зависят от относительных перемещений между соприкасающимися поверхностями. Как только эти перемещения превышают заданные пороговые значения, начинается процесс деградации жесткости, вплоть до полной потери несущей способности элемента.

В рамках диссертационного исследования моделирование межкристаллического взаимодействия выполняется с использованием когезионных элементов (Cohesive Elements типа

CON2D/CON3D). Выбор параметров когезионных элементов базируется на экспериментальных данных и литературных источниках по механическим свойствам кристаллов соли. В частности, начальная жесткость когезионного слоя должна быть достаточно высокой, чтобы минимизировать влияние на глобальную деформацию системы, но при этом позволять адекватное моделирование локальных процессов разрушения. Энергия разрушения, связанная с площадью под кривой "напряжение–относительное перемещение", служит критерием для полного отделения кристаллов.

Таким образом, использование когезионных элементов в ABAQUS CAE обеспечивает реалистичное представление процессов взаимодействия и разрушения на межкристаллическом уровне, позволяя исследовать микромеханические механизмы, лежащие в основе макроскопических деформационных и прочностных характеристик соляных пород. Рассмотрим различные законы, описывающие поведение когезионных элементов.

3.2.1 Упругое поведение когезионных элементов

В рамках моделирования когезионных взаимодействий между элементами микроструктуры материалов, таких как кристаллы соли, важную роль играет корректное описание упругого поведения когезионных элементов до момента инициации разрушения. В программной среде ABAQUS упругое поведение когезионных элементов формализовано в виде линейной упругой связи между напряжениями и относительными перемещениями в нормальном и тангенциальных направлениях. Это поведение задается на первом этапе описания материала с использованием команды *Elastic*, специфичной для когезионного материала (*Cohesive Material*).

Математически, упругое поведение когезионного элемента описывается матрицей жесткости, связывающей вектор относительных смещений (раскрытия) и вектор напряжений (tractions). В общем случае эта связь выражается как (18):

$$\begin{pmatrix} t_n \\ t_t \\ t_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{ns} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{nt} & E_{st} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_t \\ \varepsilon_s \end{pmatrix}. \quad (18)$$

где t_n, t_s, t_t - напряжения в нормальном и двух тангенциальных направлениях; $\delta_n, \delta_s, \delta_t$ - соответствующие относительные смещения; K_{nn}, K_{ss}, K_{tt} — компоненты начальной жесткости когезионного интерфейса. В случае двумерной задачи (2D) матрица упрощается до двух компонент: нормальной и одной тангенциальной.

Следует отметить, что значения жесткости должны быть выбраны таким образом, чтобы отражать поведение межкристаллического материала: они должны быть достаточно высокими для обеспечения передачи нагрузки и стабильности модели, но не чрезмерными, чтобы избежать численных коллизий, особенно при использовании явных схем интегрирования. Обычно

значения жесткости подбираются в пределах от 10^3 до 10^6 МПа/мм, в зависимости от масштаба и свойств материала.

Представленная матрица упругости позволяет обеспечить связь между всеми компонентами вектора напряжения и вектора деформации. Однако для рассматриваемой модели среды полная зависимость между векторами напряжений и деформаций не требуется, а элементы матрицы упругости, расположенные вне главной диагонали, могут быть приравнены к 0 (19):

$$\begin{pmatrix} t_n \\ t_t \\ t_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & E_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_t \\ \varepsilon_s \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где E_{ij} - коэффициенты матрицы упругости.

Вектор напряжений в рассматриваемой плоскости связующего элемента t содержит три составляющие: нормальное напряжение t_n и сдвиговые напряжения t_s и t_t . Соответствующие значения смещений обозначаются как δ_n , δ_s , δ_t . Обозначая T_0 толщиной связующего слоя, мы находим значения номинальных деформаций через компоненты смещений по следующей формуле (20):

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}; \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0}; \quad \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}, \quad (20)$$

где ε_n , ε_t , ε_s - номинальные нормальные и тангенциальные деформации.

Механическое поведение связующего элемента на трансцендентальной стадии деформации описывается в рамках механики разрушения, где накопление повреждений в материале приводит к снижению жесткости связи.

3.2.2 Критерий повреждения

После задания упругого отклика, модель Maxs Damage активирует механизм инициации разрушения, который основан на критерии максимального напряжения. В этом контексте упругое поведение когезионного слоя определяет не только начальную реакцию на нагрузку, но и уровень напряжений, при котором начинается деградация материала. В модели Maxs Damage разрушение иницируется, когда один из компонентов напряжений достигает предельного значения, заданного пользователем.

Модель учитывает, что когезионные связи между отдельными элементами среды могут быть повреждены или разрушены вследствие превышения их прочности при растяжении за счет растягивающих напряжений и/или прочности при сдвиге за счет поперечных напряжений. Критерий достижения прочности на растяжение когезионного материала в целом может быть представлен как (21):

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1, \quad (21)$$

где t_n^0, t_s^0, t_t^0 - соответственно, прочность когезионных связей при растяжении в направлении n , прочность когезионных связей при сдвиге в направлениях s и t .

Таким образом, если напряжение по одному из критериев превышает прочность на растяжение, то жесткость когезионной связи уменьшается по определенному правилу. Следует отметить, что повреждения когезионных элементов при их деформации в нормальном направлении могут накапливаться только при растяжении.

Для оценки степени повреждения введена зависимость, показывающая скорость деградации жесткости среды после достижения предельного напряженного состояния через индекс разрушения среды D . Его значение варьируется от 0, что соответствует отсутствию разрушения среды, до 1, что соответствует полной поврежденной среде, а дальнейшая связь между твердыми элементами происходит через контактное взаимодействие. Компоненты вектора напряжений когезионного элемента связаны с экспонентом D следующим образом (22):

$$\begin{aligned} t_n &= \begin{cases} (1-D)\bar{t}_n & \text{если } \bar{t}_n > 0 \\ \bar{t}_n & \text{если } \bar{t}_n \leq 0 \end{cases}; \\ t_s &= (1-D)\bar{t}_s; \\ t_t &= (1-D)\bar{t}_t, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\bar{t}_n, \bar{t}_s, \bar{t}_t$ - компоненты вектора напряжения, полученные без учета повреждений.

В качестве критерия прочности для численных расчетов был принят критерий Кулона-Мора, критерий прочности для описания прочности связи под действием сдвиговых напряжений и Ранкийский критерий для описания прочности связи под действием нормальных растягивающих напряжений (23):

$$\begin{aligned} \tau &= c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi; \\ \sigma_3 &= R_t, \end{aligned} \quad (23)$$

где τ - прочность связи при сдвиге; σ_n - нормальная составляющая напряжения в месте сдвига; c - сцепление; φ - угол трения; R_t - прочность на растяжение.

Параметры прочности Кулона-Мора являются функцией достигнутого значения нормальных напряжений на срезе с σ_n , $\varphi = f(\sigma_n)$. Нелинейная форма огибающей прочности, полученной в результате лабораторных испытаний, определяется изменением параметров c и φ .

Таким образом, корректное описание упругого отклика когезионных элементов является неотъемлемой частью реалистичного моделирования когезионных интерфейсов в ABAQUS. Оно определяет как раннюю стадию нагружения, так и условия, при которых начинается деградация когезионной связи. Особенно важно учитывать анизотропию упругого отклика при моделировании природных кристаллических материалов, таких как соль, где механическое поведение вдоль различных кристаллографических направлений может существенно отличаться.

Далее рассмотрим возможные законы разупрочнения в контексте их применения для моделирования межкристаллического взаимодействия.

3.2.3 Линейный закон разупрочнения

В процессе моделирования разрушения материалов с использованием метода конечных элементов в среде Abaqus CAE одним из ключевых аспектов является определение закона эволюции функции повреждения (damage evolution). Линейный закон развития повреждения представляет собой одну из наиболее часто используемых моделей, особенно в задачах, где требуется простое и вычислительно эффективное описание деградации прочностных характеристик материала. Для определения развития повреждений существует два параметра. Первый компонент включает в себя определение либо эффективного перемещения при полном разрушении, δ_m^f , относительно эффективного перемещения при зарождении повреждения, δ_m^0 ; либо энергии, передаваемой при разрушении, G^c (рисунок 12).

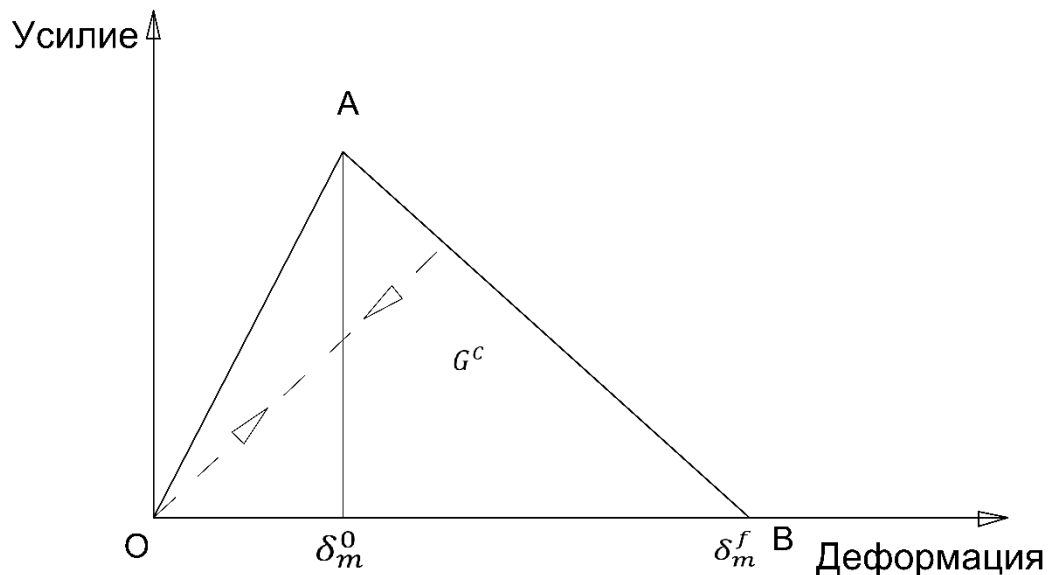


Рисунок 12 – Линейный закон разупрочнения (составлено автором)

Линейный закон повреждения предполагает, что степень повреждения материала D возрастает линейно с увеличением эффективного пластического перемещения δ_m^{max} , начиная с момента инициации разрушения. Начальная точка соответствует достижению критерия повреждения, заданного, например, на основе предельного пластического деформирования или энергии деформации. Функция повреждения при этом имеет вид (24):

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{max} (\delta_m^f - \delta_m^0)}, \quad (24)$$

где δ_m^{max} – максимальное значение эффективного смещения, достигнутое в течение времени воздействия нагрузки.

Простота данной модели обеспечивает стабильность численного расчёта и удобство калибровки параметров на основе экспериментальных данных. Однако следует учитывать, что линейная зависимость может не всегда точно описывать реальные механизмы разрушения, особенно для материалов с ярко выраженным нелинейным поведением после инициации трещины. Тем не менее, линейный закон остаётся полезным инструментом для предварительных инженерных оценок и численных экспериментов.

3.2.4 Экспоненциальный закон разупрочнения

Экспоненциальный закон развития функции повреждения представляет собой более сложный и реалистичный подход по сравнению с линейной моделью. Он используется для описания плавного, нелинейного ухудшения механических свойств материала после начала разрушения. Данный закон особенно актуален для материалов, у которых наблюдается резкое снижение несущей способности сразу после инициации трещин.

В рамках экспоненциального закона переменная повреждения D возрастает по экспоненциальной кривой с ростом эффективного пластического перемещения δ_m^{max} . Математическое выражение функции повреждения можно представить в следующем виде (25):

$$D = 1 - \left\{ \frac{\delta_m^0}{\delta_m^{max}} \right\} \left[1 - \frac{1 - \exp\left(-\alpha \left(\frac{\delta_m^{max} - \delta_m^0}{\delta_m^f - \delta_m^0} \right)\right)}{1 - \exp(-\alpha)} \right], \quad (25)$$

где α - безразмерный параметр материала, определяющий скорость развития повреждений.

Как видно из графика (рисунок 13), экспоненциальный закон обеспечивает более реалистичное приближение деградации свойств материала, особенно для горных пород, где разрушение происходит неравномерно. Он позволяет избежать искусственного смягчения и численных нестабильностей, характерных для линейной модели при мелких размерах конечных элементов, что делает его предпочтительным выбором в ряде инженерных и научных задач.

Экспоненциальный закон развития повреждения в Abaqus CAE является инструментом для более точного моделирования процессов разрушения и может быть адаптирован под конкретные условия с использованием экспериментально определённых параметров.

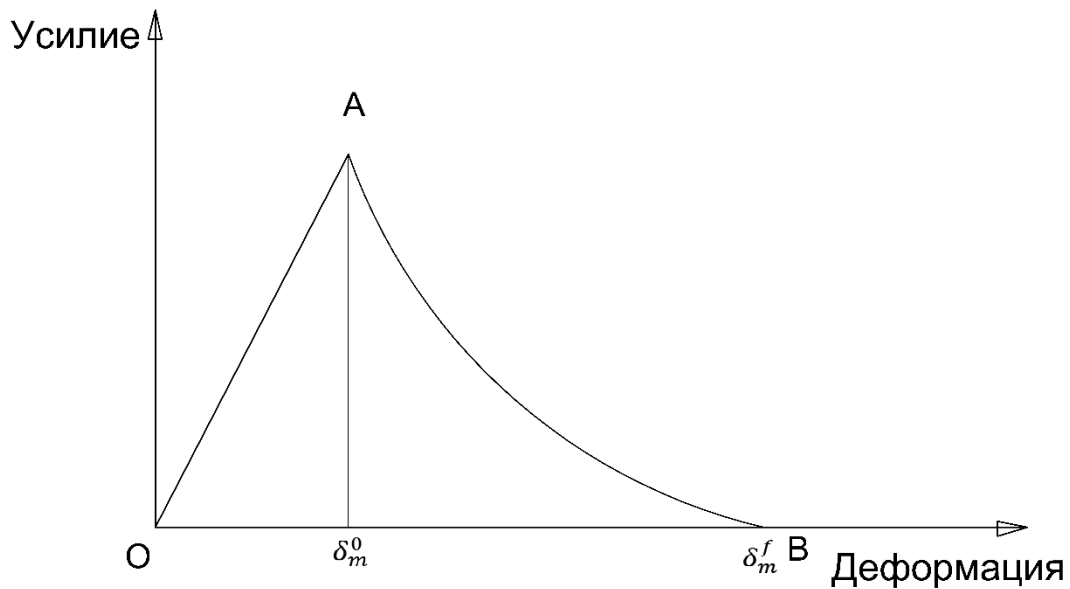


Рисунок 13 – Экспоненциальный закон разупрочнения (составлено автором)

3.2.5 Сравнительный анализ

На практике моделирования разрушения важно корректно выбрать закон эволюции повреждения, так как от него напрямую зависит точность расчёта остаточной прочности и характеристик разрушения. Для наглядности рассмотрим их поведение на основе двух графиков: изменения показателя повреждения от ширины раскрытия трещины и изменения прочности от ширины раскрытия трещины.

На первом графике (рисунок 14) изображено, как изменяется показатель повреждения D в зависимости от максимального раскрытия трещины δ_m^{max} . Черная кривая соответствует линейному закону ($D_l(\delta_m^{max})$), синяя — экспоненциальному $D_e(\delta_m^{max})$,

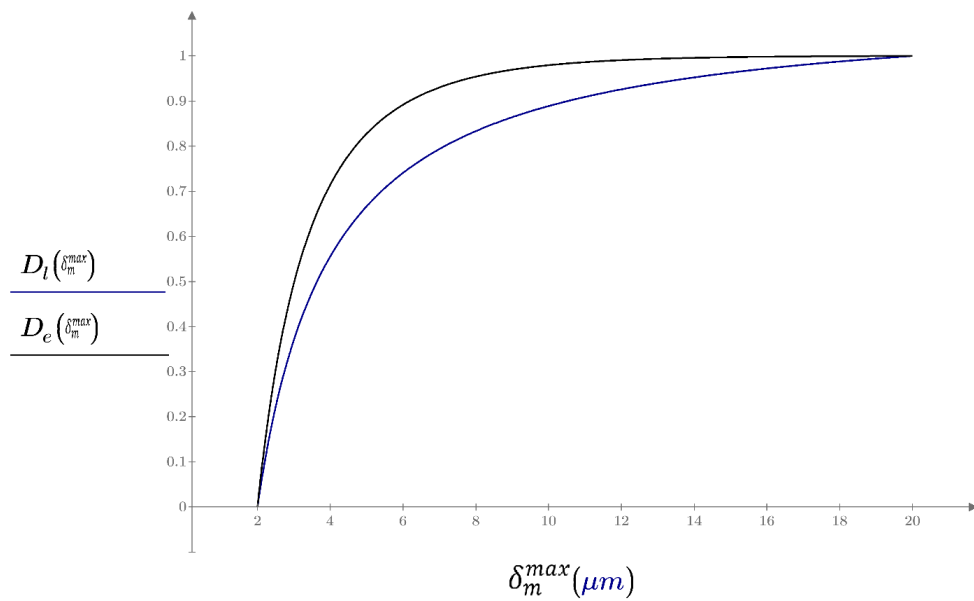


Рисунок 14 – Кривые изменения показателя повреждения от раскрытия трещины (составлено автором)

Линейный закон характеризуется прямолинейным увеличением повреждения от начального значения до единицы. Это означает, что при каждом равном приращении раскрытия трещины прирост повреждения остаётся постоянным. Такой подход удобен для материалов с равномерной деградацией, но не отражает резкие переходы в поведении, характерные для хрупких материалов.

Экспоненциальный закон, в свою очередь, демонстрирует более плавное и реалистичное нарастание повреждения. На начальных этапах разрушения рост D замедлен, что соответствует эффекту "откладывающегося" разрушения. Затем повреждение быстро возрастает, достигая "насыщения" при больших значениях раскрытия. Этот тип поведения позволяет точнее смоделировать повреждение при трещинообразовании в хрупких и квазихрупких материалах.

Второй график иллюстрирует, как изменяется нормальное напряжение T_n в зависимости от ширины раскрытия трещины δ_m^{max} . Здесь также представлены две кривые: синяя — линейная деградация прочности $T_{n,l}$, черная — экспоненциальная $T_{n,e}$ (рисунок 15).

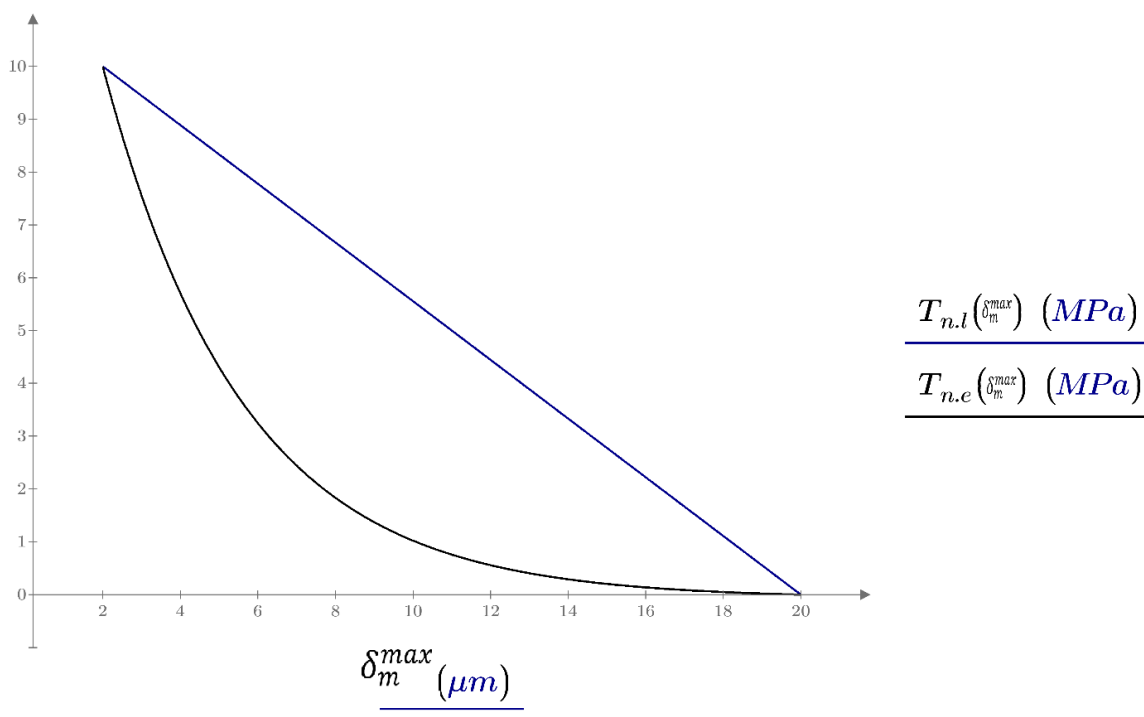


Рисунок 15 – Кривые изменения прочности от раскрытия трещины (составлено автором)

Линейная модель показывает равномерное уменьшение напряжения от максимального значения до нуля, что может быть слишком грубым приближением, особенно для случаев резкого потери несущей способности после пика. Такая модель часто приводит к численным неустойчивостям, если не сопровождается регуляризацией (например, через характеристическую длину элемента).

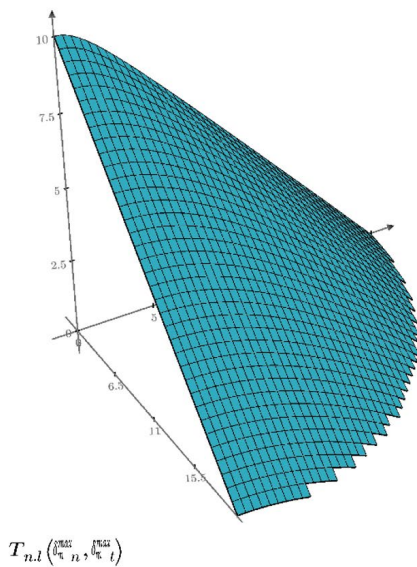
Экспоненциальная зависимость напряжения убывает более постепенно на начальном этапе и резко снижается при достижении определённого предела. Это соответствует физике

разрушения многих реальных материалов, где сначала происходит микроповреждение без существенной потери прочности, а затем наступает лавинообразное разрушение структуры.

Дополнительно к одномерным зависимостям повреждения и напряжений от раскрытия трещины, представленным ранее, для более полного описания поведения материала при разрушении важно рассмотреть двумерные поверхности, показывающие, как изменяются нормальные напряжения в зависимости одновременно от нормального и касательного компонент раскрытия трещины.

На первой представленной диаграмме (рисунок 16 а) визуализирована поверхность нормального напряжения, построенная по линейному закону деградации. Поверхность имеет практически плоскую треугольную форму, равномерно убывая от максимального значения при малых раскрытиях трещины к нулю при достижении предельной деформации. Это указывает на линейную зависимость прочности от комбинированного раскрытия, где каждое приращение раскрытия приводит к пропорциональной потере прочности.

а)



б)

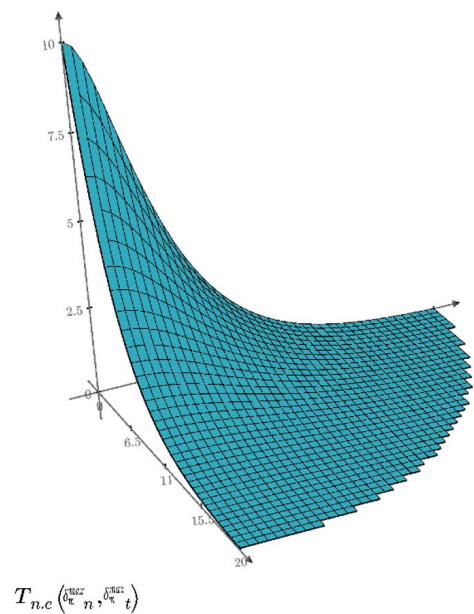


Рисунок 16 – Анализ пространственных поверхностей изменения прочности при раскрытии трещины: а) линейный закон, б) экспоненциальный закон (составлено автором)

Такой подход достаточно прост, но не отражает эффектов взаимодействия между нормальной и касательной компонентами, особенно в случае, когда одна из них изменяется значительно быстрее другой. В результате модель может переоценивать устойчивость материала на ранних стадиях разрушения.

Вторая диаграмма (рисунок 16 б) представляет поверхность по экспоненциальному закону. Здесь форма поверхности сильно отличается: она имеет выпуклый профиль и показывает

резкое снижение прочности при небольших увеличениях раскрытия. Основная часть напряжений сконцентрирована вблизи нулевых значений, после чего происходит стремительная деградация.

Такой тип поверхности более адекватно отражает механизмы взаимодействия по границам зёрен в кристаллических материалах, таких как соли. Особенно это важно для учёта локализованного скольжения или микротрещинообразования, где касательное смещение значительно ускоряет разрушение даже при умеренном нормальном раскрытии.

На основании приведённого сравнительного анализа можно сделать обоснованный вывод, что экспоненциальный закон развития функции повреждения является более подходящим при моделировании межкристаллических взаимодействий в соляных породах.

Соляные породы, в особенности галит и другие кристаллические минералы, демонстрируют выраженное квазихрупкое поведение при краткосрочном нагружении: в начальной стадии деформации они способны аккумулировать микроповреждения без значительной потери прочности, после чего следует резкий переход к разрушению по границам кристаллов. Такое поведение трудно адекватно описать линейным законом, который предполагает равномерную деградацию прочностных характеристик на всём протяжении процесса разрушения.

Экспоненциальная модель в данном контексте даёт более реалистичную оценку процессов, происходящих на межкристаллитных границах, где наблюдаются постепенные накопления дефектов (включая микротрещины и скольжение), предшествующие катастрофическому разрушению. Именно экспоненциальная зависимость позволяет отразить:

- замедленный рост повреждения на ранней стадии межкристаллического скольжения;
- быструю потерю прочности после достижения определённого предела раскрытия трещины;
- непрерывную, но нелинейную эволюцию повреждения, соответствующую экспериментальным данным по разрушению соляных пород.

Кроме того, экспоненциальный закон обладает большей численной устойчивостью при моделировании с мелкими конечными элементами, что особенно важно для корректной аппроксимации геометрии зерен и межфазных границ внутри кристаллической структуры соляных пород.

Таким образом, с учётом микромеханики разрушения и особенностей реологического поведения соляных пород, экспоненциальный закон повреждения является более физически обоснованным и применимым подходом для задач, связанных с моделированием межкристаллического взаимодействия и деградации в кристаллических средах соляного типа.

3.2.6 Контактное взаимодействие между сплошными элементами после выхода из строя когезионных

После разрушения когезионных связей между двумя телами их дальнейшее взаимодействие осуществляется за счёт прямого контакта сплошных элементов. Такой переход принципиально меняет характер взаимодействия: когезионные элементы, ранее воспринимавшие напряжения и контролировавшие поведение материала в зоне разрушения, больше не несут нагрузку, и механическая связь между фрагментами обеспечивается через контактные силы. В новой фазе контакта формируется силовое взаимодействие двух типов — касательное и нормальное. Касательное взаимодействие моделирует трение и сопротивление сдвигу между поверхностями, которые могут смещаться относительно друг друга.

В рамках этой модели сила трения прямо пропорциональна касательному смещению и величине контактного давления. Поверхности, оказавшиеся в соприкосновении после разрушения, могут частично проскальзывать, сохраняя при этом сопротивление за счёт трения. Нормальное взаимодействие определяет, как тела реагируют при попытке проникновения друг в друга. Оно реализуется через упругую реакцию — при сближении поверхностей возникает сила прижатия, пропорциональная глубине "вдавливания". Такая сила препятствует геометрическому наложению тел и обеспечивает их отталкивание при чрезмерном сближении. Оба механизма — касательное сопротивление и нормальное отталкивание — в совокупности описывают реальную картину взаимодействия разрушенных элементов, например, в породах, где после разрушения связи между зёрнами сохраняется контакт за счёт трения и прижатия. Этот подход особенно важен в моделировании микромеханики кристаллических сред, таких как соляные породы, где трещины не всегда приводят к полному разъединению материала, а сопровождаются сложными контактными процессами.

3.2.7 Демпфирование системы и нивелирование энергии удара при выходе из строя когезионных элементов

При решении задач в динамической постановке, особенно с применением явного интегратора возникает необходимость в подавлении высокочастотных осцилляций и смягчение искусственных скачков давления, которые возникают в зонах с резкими градиентами скоростей деформации, например, при ударе, разрушении или распространении ударных волн.

Объёмная вязкость — это численно-вспомогательный механизм, предназначенный для стабилизации решений в задачах, связанных с интенсивной динамикой, такими как удары, взрывы или быстрые деформации сжимаемого материала.

В контексте моделирования разрушения поликристаллической структуры соли объёмная вязкость играет критически важную роль в обеспечении численной устойчивости расчетов и

достоверного воспроизведения физических процессов в зоне разрушения. Соляные породы, такие как галит, представляют собой кристаллическую среду, склонную (при краткосрочном нагружении) к хрупкому или квазихрупкому разрушению с локализацией деформации по границам зёрен и образованием межкристаллитных трещин. В подобных условиях особенно характерны резкие градиенты напряжений и скоростей деформации, которые могут вызывать численные неустойчивости, если они не будут должным образом сглажены.

При разрушении границ кристаллитов, когда когезионные связи ослабевают или полностью утрачиваются, соседние зерна начинают взаимодействовать через прямой контакт. В этот момент наблюдаются интенсивные перераспределения нагрузок и скачкообразные изменения объёма на микроуровне. Такие процессы сопровождаются высокоскоростным локальным сжатием и сдвигом, что может привести к возникновению неустойчивых фронтов давления, искусственных отражений волн и даже «коллапса» сетки при отсутствии дополнительной демпфирующей меры.

В этих условиях объемная вязкость вводится как численно-упругий механизм, компенсирующий резкие скачки сжимающей деформации. Она добавляет к нормальному давлению вязкий компонент, пропорциональный скорости объемного сжатия. Это позволяет смягчать неустойчивости, возникающие при интенсивной локализации напряжений, особенно в зонах межзеренного разрушения. В случае соли, где скорость распространения волн относительно невелика, а плотность высока, влияние объемной вязкости особенно выражено и даёт положительный эффект — она не мешает макроскопическому разрушению, но эффективно подавляет микроскопические численные осцилляции.

Кроме того, структура соли как поликристаллической среды требует мелкой расчётной сетки для точного описания геометрии зёрен. А чем меньше конечный элемент, тем выше риск возникновения численных шумов. В этом случае объемная вязкость, адаптируемая к размеру элемента, служит важным инструментом для стабилизации модели без искажения макрофизических результатов.

Таким образом, при моделировании разрушения поликристаллической структуры соли объемная вязкость выполняет функцию виртуального демпфера, смягчающего резкие переходы, возникающие при межкристаллитном разрушении, и позволяет достоверно воспроизвести механизм образования трещин, перераспределения напряжений и контактных взаимодействий между зёрнами.

3.2.8 Исследование степени влияния параметров модели на механический отклик системы

Понимание того, как отдельные параметры численной модели влияют на механическое поведение поликристаллического материала, является ключевым этапом валидации и

последующей интерпретации результатов моделирования. Особенно актуально это в случае гетерогенных сред, таких как соляные породы, где макроскопический отклик системы формируется в результате сложного взаимодействия между кристаллитами, их ориентацией, механическими свойствами и прочностью межзерновых связей.

В настоящем разделе проводится систематическое исследование чувствительности модели к изменениям основных параметров, определяющих поведение как отдельных кристаллов, так и межзерновых контактов. Анализ основывается на серии параметрических расчётов, в которых варьируются значения ключевых характеристик модели, а именно:

- **Модуля деформации отдельных кристаллов**, определяющего жёсткость зерен и их способность воспринимать внешнюю нагрузку;
- **Сцепления между кристаллами**, как параметра, задающего сопротивление разрушению в условиях сдвига и растяжения;
- **Прочности межзернового контакта**, влияющей на целостность границ и устойчивость структуры к межкристаллитному разрушению;
- **Энергии разрушения**, определяющей работу, необходимую для инициирования и развития трещин вдоль границ зерен.

Каждый из этих факторов оказывает прямое влияние на механический отклик всей системы, включая прочностные характеристики, характер распределения напряжений и формирование зон локализованной деформации. Проведение количественного анализа влияния этих параметров позволяет не только уточнить поведение модели, но и выявить наиболее чувствительные зоны, критичные к изменению свойств материала. Это, в свою очередь, создаёт основу для более точной интерпретации экспериментальных данных и повышения прогностической точности моделей разрушения в геомеханике и смежных областях.

В результате численного анализа были получены кривые деформирования и разрушения образца при различных модулях деформации (рисунок 17 а). Отчетливо прослеживается очевидная закономерность увеличения пиковой прочности образца с увеличением модуля деформации отдельных кристаллов, также стоит отметить, что угол наклона упругого участка кривой деформирования образца возрастает с увеличением модуля деформации. Таким образом получаем эмпирическую зависимость пиковой прочности образца при одноосном сжатии (26):

$$\sigma_{сж} = -0,0327 \cdot E_{кр}^2 + 1,4216 \cdot E_{кр} + 11,05; \quad (26)$$

где: $\sigma_{сж}$, МПа – пиковое значение прочности образца на одноосное сжатие; $E_{кр}$, ГПа – значение модуля деформации кристаллов соли;

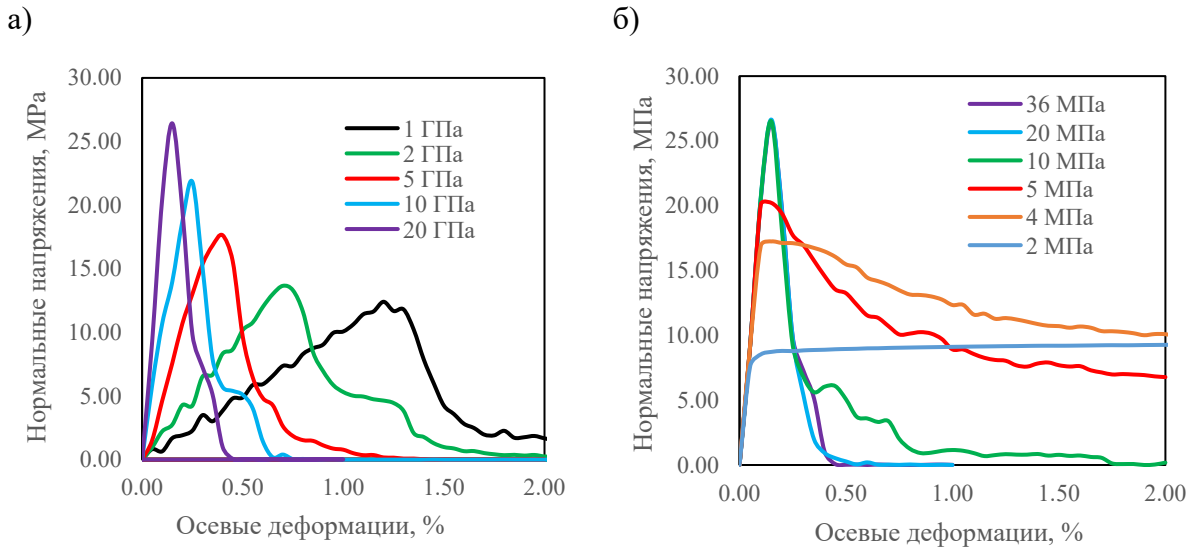


Рисунок 17 – Кривые деформирования образца соли при различных значениях: а) модуля деформации; б) сцепления (составлено автором)

Величина сцепления кристаллов соли также оказывает влияние на характер кривой деформирования, но в данном случае в большей степени изменяется участок запредельного деформирования (рисунок 17 б).

Также стоит рассмотреть влияние таких факторов, как значение энергии разрушения (эквивалентно представленное как значения разрушающей деформации), а также величины нормальной прочности контакта. Стоит отметить, что пиковое значение прочности образца при одноосном сжатии напрямую зависит от величины прочности контакта между отдельными кристаллами (рисунок 18 а)

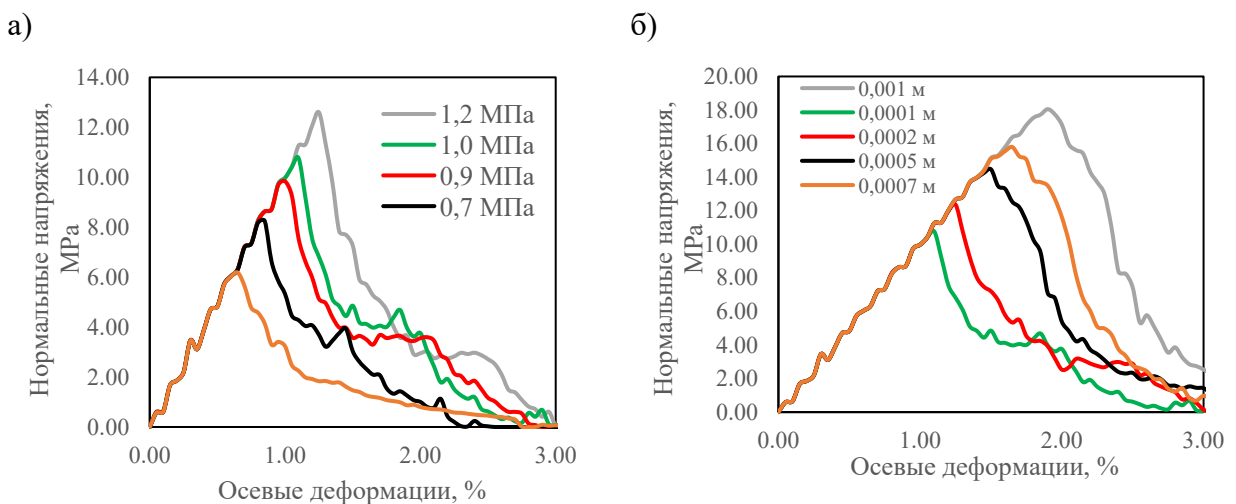


Рисунок 18 – Кривые деформирования образца соли при различных значениях: а) прочности межзернового контакта; б) энергии разрушения (составлено автором)

Анализ полученных данных позволяет с уверенностью говорить о том, что зависимость между пиковой прочностью образца и нормальной прочностью контакта линейна (27):

$$\sigma_{\text{сж}} = 9,0411 \cdot \sigma_{\text{нк}} + 1,749 \quad (27)$$

где: $\sigma_{сж}$, МПа — пиковое значение прочности образца на одноосное сжатие; $\sigma_{нк}$, МПа — значение нормальной прочности контакта между отдельными кристаллами в образце;

Энергия разрушения в свою очередь оказывает схожее влияние на кривую деформирования (рисунок 18 б). Но для дальнейших исследований следует использовать прочность контакта, как более осязаемый критерий.

3.3 Определение степени влияния макроструктуры соляных пород на ее механическое поведение

Механическое поведение соляных пород определяется не только физико-механическими свойствами отдельных кристаллов и прочностью межзеренных связей, но в значительной степени зависит от особенностей их макроструктуры. Под макроструктурой в данном контексте понимается совокупность геометрических и пространственных характеристик зерен: их форма, размер, ориентация, степень контакта и плотность упаковки. Эти параметры напрямую влияют на распределение напряжений, локализацию деформаций и сценарии разрушения в объёме материала. Понимание степени влияния макроструктурных особенностей на прочность и деформационные характеристики соляной породы является ключом к точному моделированию её поведения при различных нагрузках и к последующему прогнозированию устойчивости инженерных сооружений, расположенных в массиве соли.

В рамках данного раздела будет проведена серия краткосрочных численных испытаний, направленных на изучение влияния макроструктуры на механический отклик образца. Под краткосрочными испытаниями в данном случае понимаются процессы нагружения, реализуемые в условиях, при которых влияние ползучести, релаксации и длительного накопления микрповреждений пренебрежимо мало. Все испытания предполагают относительно быструю скорость нагружения и акцент на начальную прочность материала и начальные стадии разрушения. Будут смоделированы три характерных типа нагружения: одноосное сжатие, позволяющее исследовать поведение материала при простом вертикальном нагружении; трёхосное сжатие, при котором материал испытывает сжимающее воздействие во всех направлениях и проявляются более сложные механизмы сопротивления; а также растяжение, реализованное бразильским методом, где образец подвергается сжатию вдоль диаметра с целью вызвать центральное растяжение в плоскости диска. Эти испытания позволяют оценить не только прочностные характеристики, но и то, как макроструктурные особенности влияют на форму и направление зарождения трещин, характер пластической локализации и геометрию зон разрушения.

В результате калибровки модели были подобраны следующие параметры модели (Таблица 3).

Таблица 3. Параметры модели при описании когезионных элементов (составлено автором)

Прочность на растяжение	МПа	1.00	1.00	1.00	1.00
Сцепление	МПа	1.30	2.00	2.70	37.01
Угол внутреннего трения	град.	35.00	35.00	35.00	35.00
Энергия разрушения при отрыве	Н*мм	0.080	0.080	0.080	0.080
Энергия разрушения при сдвиге	Н*мм	0.052	0.080	0.108	1.480
Модуль упругости (растяжение)	ГПа	800	800	800	800
Модуль упругости (сдвиг)	ГПа	200	200	200	200
Величина нормальных напряжений	-	1.00	0.00	-1.00	-50.00

Проведённый анализ станет основой для более глубокого понимания роли структурной организации в прочностном поведении соляных пород и заложит фундамент для построения прогнозных геомеханических моделей с учётом реальной микроструктуры материала.

3.3.1 Описание процесса деформирования и разрушения в рамках предложенного подхода

Для реализации представленного в работе подхода проведем ряд численных испытаний идентичных реальным лабораторным тестам. Представленные на изображении (рисунок 19) результаты виртуального численного моделирования одноосного сжатия образца каменной соли демонстрируют высокую степень соответствия с данными лабораторных испытаний, что служит убедительным доказательством достоверности применённого в работе подхода.

Сравнительный анализ диаграммы «напряжение–деформация» показывает, что численная модель адекватно воспроизводит как форму кривой нагружения, так и предельные прочностные характеристики материала. Особенно важно, что модель точно описывает поведение материала на докритической стадии — вплоть до достижения пикового напряжения, где происходит переход от упругой деформации к началу разрушения.

На графике чётко прослеживаются четыре ключевых этапа нагружения, каждый из которых дополнительно проиллюстрирован микроструктурными изображениями образца. Эти изображения позволяют наглядно отследить эволюцию разрушения на уровне зерен: от начального неразрушенного состояния до полной локализации деформации в зоне макротрещины. В процессе нагружения численная модель демонстрирует реалистичные механизмы разрушения, включая развитие микроповреждений по межзеренным границам, перераспределение напряжений и формирование диагональной трещины, характерной для солей. Такое поведение согласуется с наблюдаемыми экспериментально феноменами при физическом одноосном сжатии соляных пород.

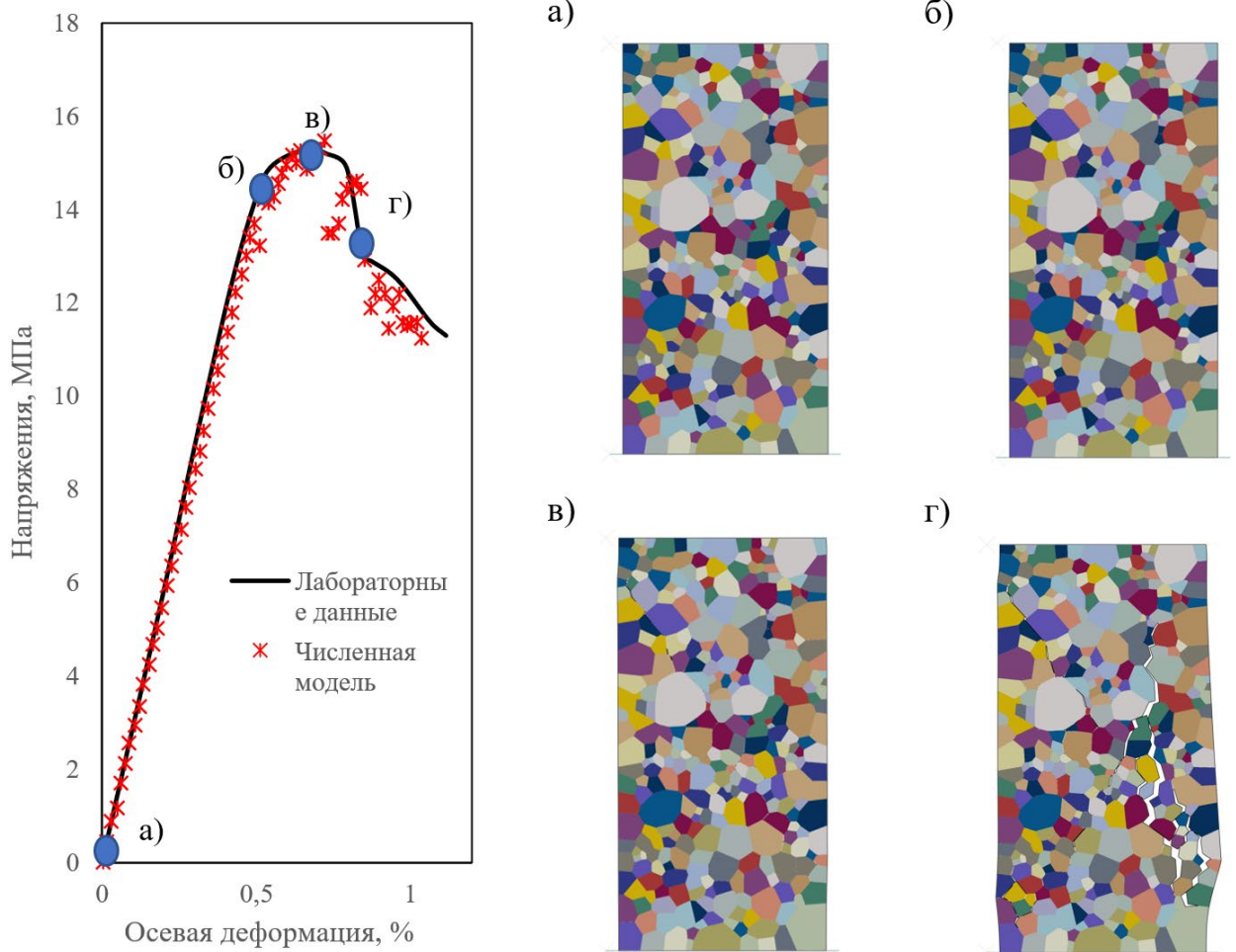


Рисунок 19 – Характер разрушения образца каменной соли при виртуальном испытании на одноосное сжатие (составлено автором)

Таким образом, достигнутое качественное и количественное совпадение между численными и лабораторными результатами позволяет утверждать, что рассматриваемый в работе подход способен достоверно описывать процесс деформирования и разрушения поликристаллической структуры соли при краткосрочном одноосном сжатии, а, следовательно, может быть использован как надёжный инструмент для прогнозирования механического отклика реальных образцов.

Результаты численного моделирования (рисунок 20) трёхосных испытаний образца каменной соли диаметром 40 мм и высотой 80 мм, позволяют оценить прочностные характеристики материала в условиях всестороннего сжатия. На рисунке представлено два графика: слева — диаграммы зависимости осевого напряжения от деформации при различных уровнях всестороннего давления (0, 1, 3 и 5 МПа), справа — кривая Мора–Кулона, построенная на основе результатов этих испытаний.

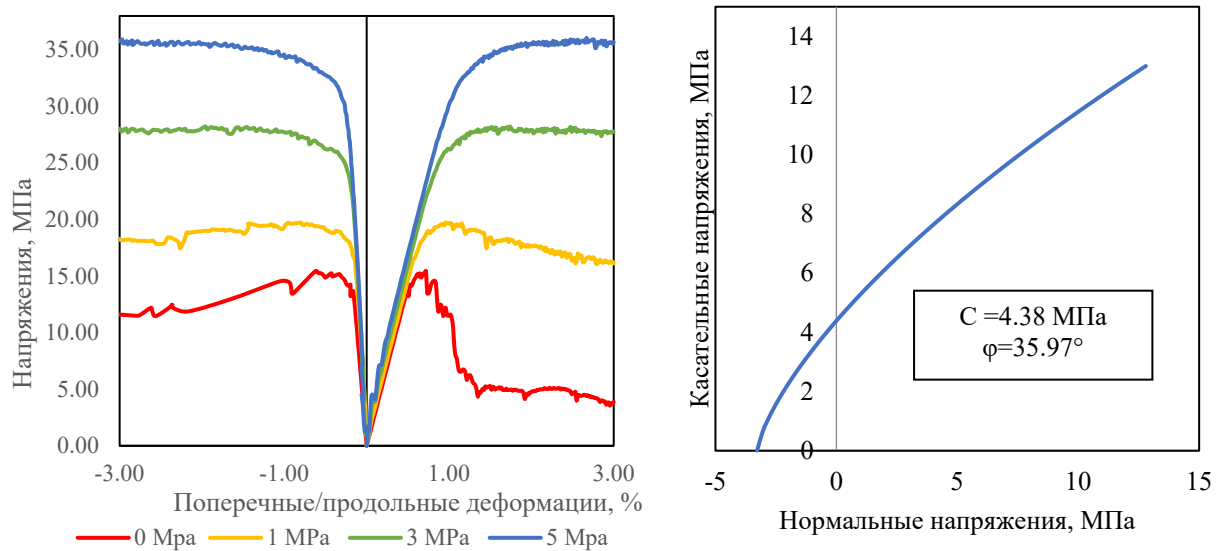


Рисунок 20 – Результаты численных испытаний характерного образца каменной соли диаметром 40 мм и высотой 80 мм (составлено автором)

График слева демонстрирует, что с увеличением бокового давления прочность материала закономерно возрастает. Это проявляется в виде последовательного смещения кривых вверх: при нулевом всестороннем давлении пиковое напряжение составляет около 14 МПа, а при 5 МПа — превышает 35 МПа. Такая динамика полностью соответствует экспериментально наблюдаемому эффекту упрочнения за счёт ограничения бокового расширения, что подтверждает корректность реализации трёхосной схемы нагружения в численной модели. Кроме того, форма кривых отражает типичное поведение горных пород: линейный участок, пик прочности и последующее снижение напряжения, указывающее на начало разрушения.

График справа — диаграмма «нормальные–касательные напряжения», полученная по результатам моделирования. Построенная огибающая соответствует критерию Мора–Кулона, позволяя количественно определить параметры прочности материала: сцепление 4,38 МПа и угол внутреннего трения $35,97^\circ$. Эти значения укладываются в диапазон, характерный для каменной соли, и служат дополнительным подтверждением реалистичности моделирования.

Особое значение имеет применение бразильского метода (раскалывание образца радиальным сжатием) для оценки косвенной прочности на растяжение. Моделирование на основе тесселяции Вороного позволяет воспроизвести типичное разрушение по центральной трещине, ориентированной вдоль оси нагружения, с величиной прочности на растяжение 1–4 МПа, что соответствует хрупкому отклику соляных пород в реальных условиях (рисунки 21, 22).

Таким образом, проведённый численный анализ демонстрирует способность рассматриваемой модели достоверно воспроизводить механическое поведение соляной породы при различных уровнях всестороннего давления. Модель не только правильно отражает общую

форму диаграмм напряжение–деформация, но и позволяет извлекать параметры сопротивления сдвигу, сопоставимые с известными физическими характеристиками материала. Это указывает на то, что предложенный подход является адекватным инструментом для моделирования трёхосных испытаний и анализа прочностных свойств солей в условиях всестороннего напряжённого состояния, характерного для реальных геомеханических задач.

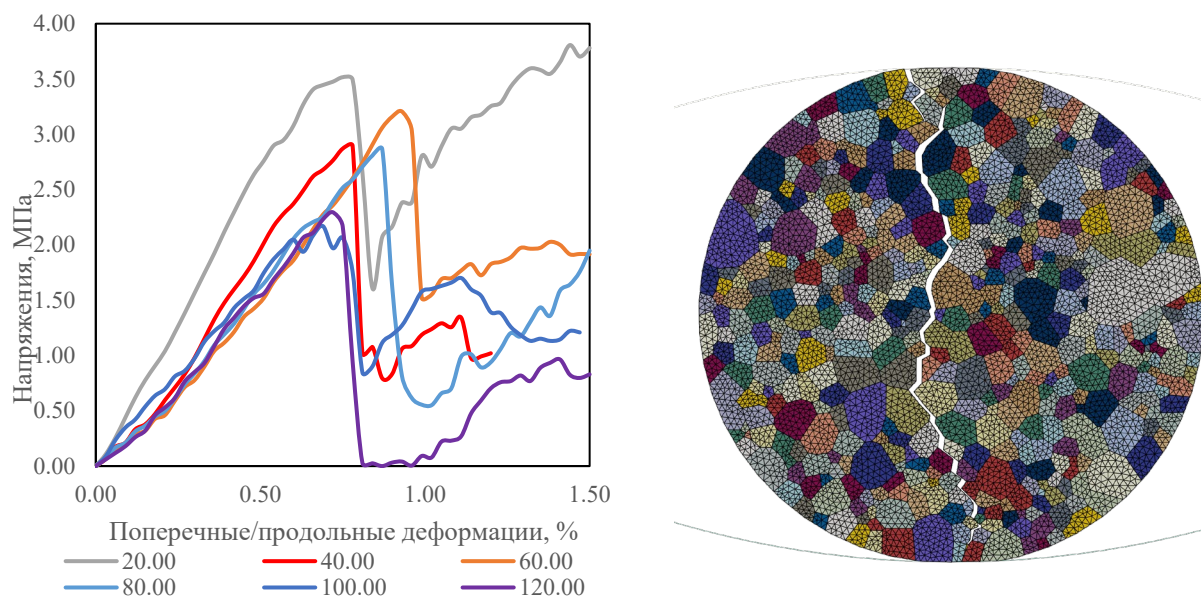


Рисунок 21 – Результаты численных испытаний на растяжение образцов различного диаметра (составлено автором)

3.3.2 Масштабный эффект

В поликристаллических материалах, таких как каменная соль, важным аспектом надёжного численного моделирования является учет масштабного эффекта структуры — зависимости механических характеристик материала от соотношения размеров отдельных зёрен и размеров моделируемого образца. При недостаточном размере образца по отношению к размеру зерен результирующий механический отклик может искажаться из-за доминирования краевых эффектов, недостаточной статистической репрезентативности или анизотропии структуры, проявляющейся на малых масштабах.

В рамках настоящего исследования с целью количественной оценки масштабного эффекта были виртуально испытаны образцы различного размера, содержащие одинаковое распределение размеров, форм и ориентаций кристаллов соли. Во всех случаях сохранялась постоянная геометрическая структура зёрен, в то время как варьировались габариты образца, тем самым изменяя отношение общей площади образца к средней площади одного кристалла. Далее представлены результаты (рисунок 22) численного моделирования образцов каменной соли различного размера при одноосном и трёхосном нагружении, выполненного с целью выявления масштабного эффекта структуры.

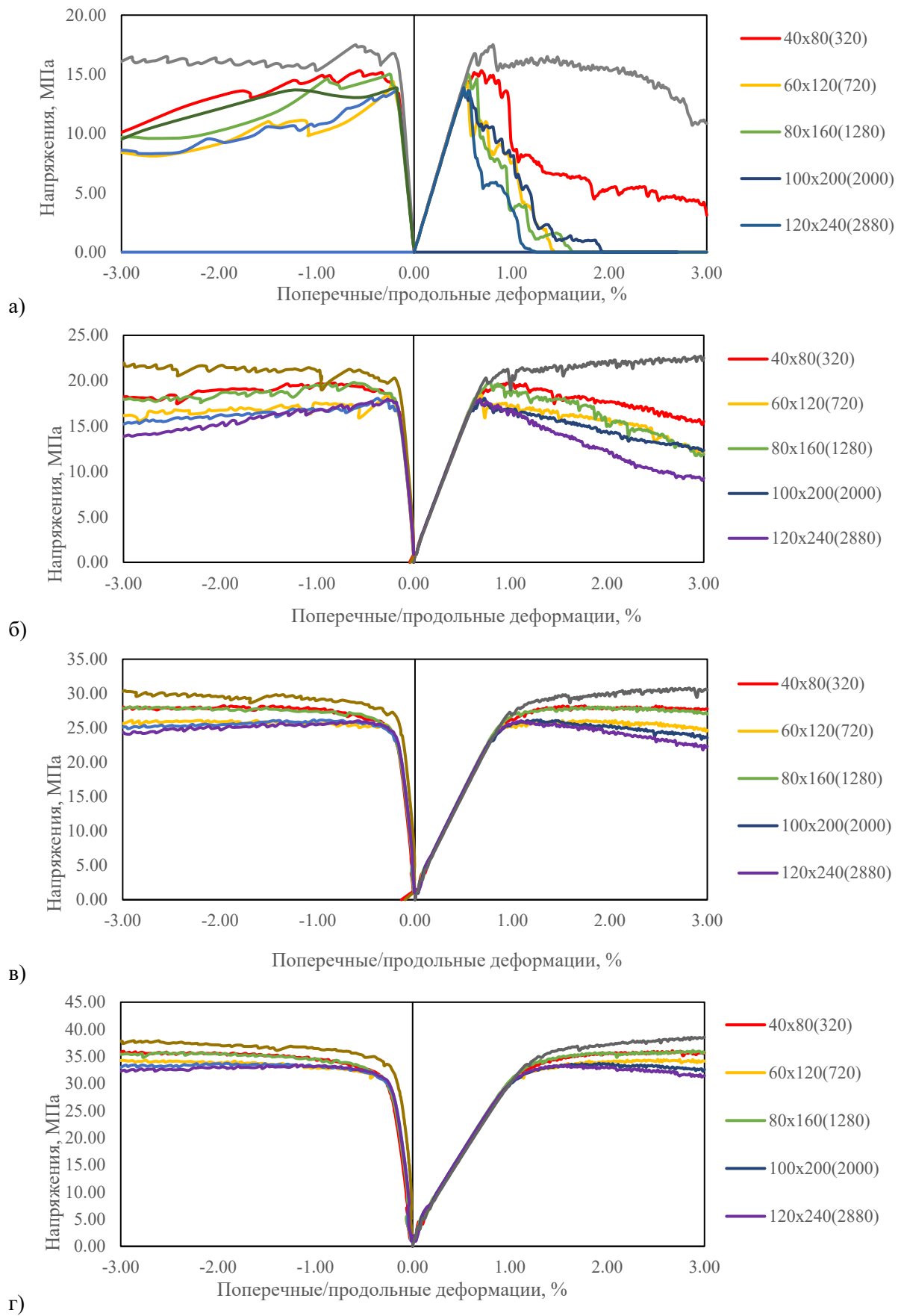


Рисунок 22 – Результаты численных испытаний образцов разных размеров при различном боковом обжатии: а) 0 МПа, б) 1 МПа, в) 3 МПа, г) 5 МПа (составлено автором)

Все образцы имеют одинаковое распределение размеров, форм и ориентаций кристаллов, что позволяет изолировать влияние геометрического масштаба и определить, при каком соотношении размеров зёрен и образца отклик модели становится стабильным и не зависит от масштабных факторов. На графиках показаны зависимости напряжения от поперечной/продольной деформации для пяти вариантов образцов с размерами от 40×80 мм до 120×240 мм и соответствующим количеством зёрен от 320 до 2880. Каждый из четырёх графиков соответствует различному уровню всестороннего обжатия: 0, 1, 3 и 5 МПа. При нулевом боковом давлении (а) влияние масштабного эффекта выражено наиболее ярко. Малые образцы демонстрируют заметно меньшую прочность и большую степень рассеяния после достижения пикового напряжения, что связано с преобладанием краевых эффектов и недостаточной статистической репрезентативностью микроструктуры. Поведение образцов при этом сильно зависит от конкретной конфигурации зёрен.

С увеличением размеров образцов наблюдается стабилизация кривых, повышение пиковых напряжений и сглаживание постпиковой части диаграммы. При боковом давлении 1 МПа (б) влияние масштаба сохраняется, но становится менее выраженным — кривые более согласованы, однако расхождения ещё заметны.

На уровне обжатия 3 МПа (в), а особенно при 5 МПа (г) все кривые, соответствующие различным размерам образцов, практически совпадают как по уровню прочности, так и по характеру деформационного отклика. Это указывает на то, что при повышенном всестороннем давлении разрушение становится более равномерным, локализованные эффекты микроструктуры сглаживаются, и поведение материала определяется усреднёнными характеристиками. Таким образом, масштабный эффект проявляется только при низких давлениях и малом количестве зёрен в модели. С увеличением числа зёрен выше определённого порога влияние отдельной структуры на прочность становится несущественным.

Анализ полученных данных (рисунок 23) позволяет обобщить результаты исследования масштабного эффекта и количественно подтвердить ранее сделанные выводы. На графике (а) показаны паспорта прочности — зависимости касательных напряжений от нормальных — для образцов разного размера, включая модель минимального масштаба (20×40 мм) и модель максимального масштаба (120×240 мм). Видно, что при уменьшении размера образца паспорта прочности смещаются вверх, демонстрируя завышенные значения сопротивления сдвигу. Это связано с недостаточной репрезентативностью малых образцов: при ограниченном числе зёрен материал демонстрирует локальные усиления, вызванные особенностями конкретной микроструктурной реализации. По мере увеличения размера модели кривые постепенно сходятся, а при размерах 100×200 мм и выше становятся практически идентичными, что

указывает на достижение **репрезентативного объёма материала**, при котором масштабный эффект исчезает.

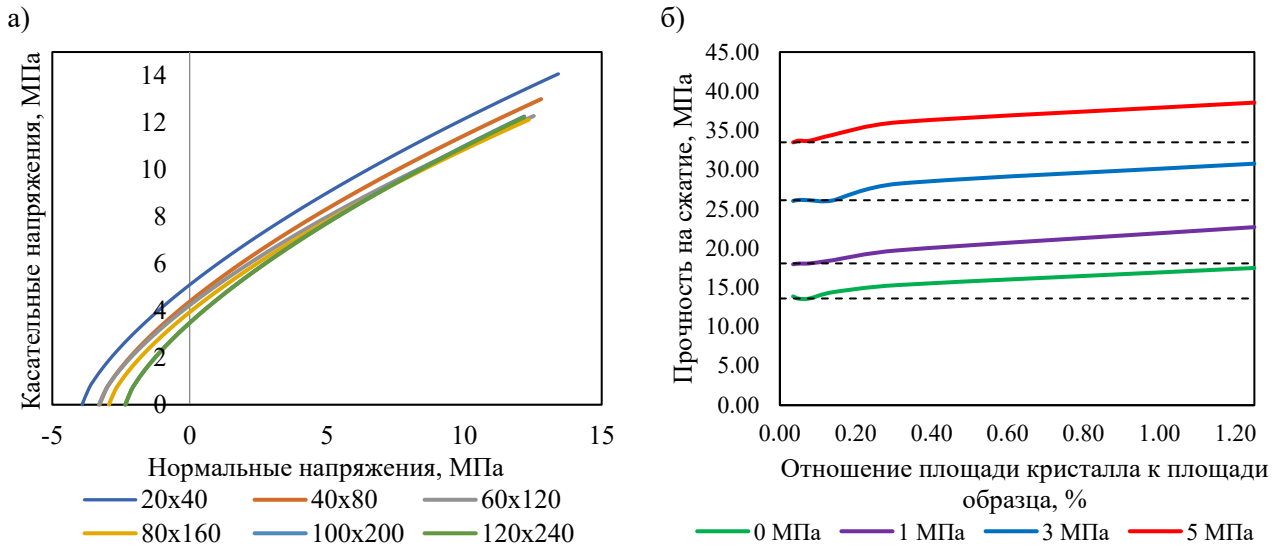


Рисунок 23 – Масштабный эффект: а) паспорта прочности при различных размерах образцов, б) выявление масштабного эффекта при различных значениях бокового давления (составлено автором)

График (б) количественно демонстрирует зависимость прочности на сжатие от отношения площади одного зерна к общей площади образца при различных уровнях всестороннего давления. Для всех уровней давления прослеживается одна и та же закономерность: при высоких значениях доли зерна (то есть в малых образцах) прочность возрастает, однако при уменьшении этого соотношения (в более крупных образцах) прочность выходит на плато. Это плато, показанное пунктирными линиями, соответствует устойчивому значению прочности, не зависящему от масштаба. Таким образом, критическим порогом, при котором масштабный эффект становится пренебрежимо малым, можно считать отношение площади зерна к площади образца менее 0,05 %.

Также можно отметить, что с увеличением бокового давления чувствительность модели к размеру возрастает менее выражено, а плато достигается быстрее. Это ещё раз подтверждает, что при высоком всестороннем давлении разрушение становится более объемным и менее подверженным влиянию локальных структурных неоднородностей.

В совокупности представленные графики подтверждают, что при правильно выбранных масштабах численная модель позволяет достоверно воспроизводить механический отклик поликристаллической соли. Образцы, в которых количество зёрен превышает ~2000 и отношение площади зерна к площади модели составляет менее 0,05 %, могут считаться репрезентативными. Таким образом, сформулированы чёткие геометрические и статистические критерии, позволяющие избежать искажений, связанных с масштабным эффектом, при построении микроструктурно ориентированных моделей соляных пород.

3.3.4 Влияние размера и формы кристаллов на процесс деформирования и разрушения

Проведенные виртуальные испытания образцов соляных пород с различной морфологией зерен позволили детально исследовать взаимосвязь между микроструктурными параметрами и макроскопическими механическими свойствами. Результаты подтверждают, что форма, размер и распределение фракций зерен играют ключевую роль в определении характера деформирования и разрушения поликристаллических материалов. Особое внимание в исследовании уделено параметру округлости зерен, который варьировался в диапазоне от 0.100 (идеально округлые частицы) до 0.225 (выраженно угловатые) с шагом 0.025. Виртуальные эксперименты проводились с использованием метода конечно-дискретных элементов (FDEM), где каждая частица моделировалась с заданной геометрией, а взаимодействия между зернами учитывались за счет изменения прочности контакта (рисунок 24).

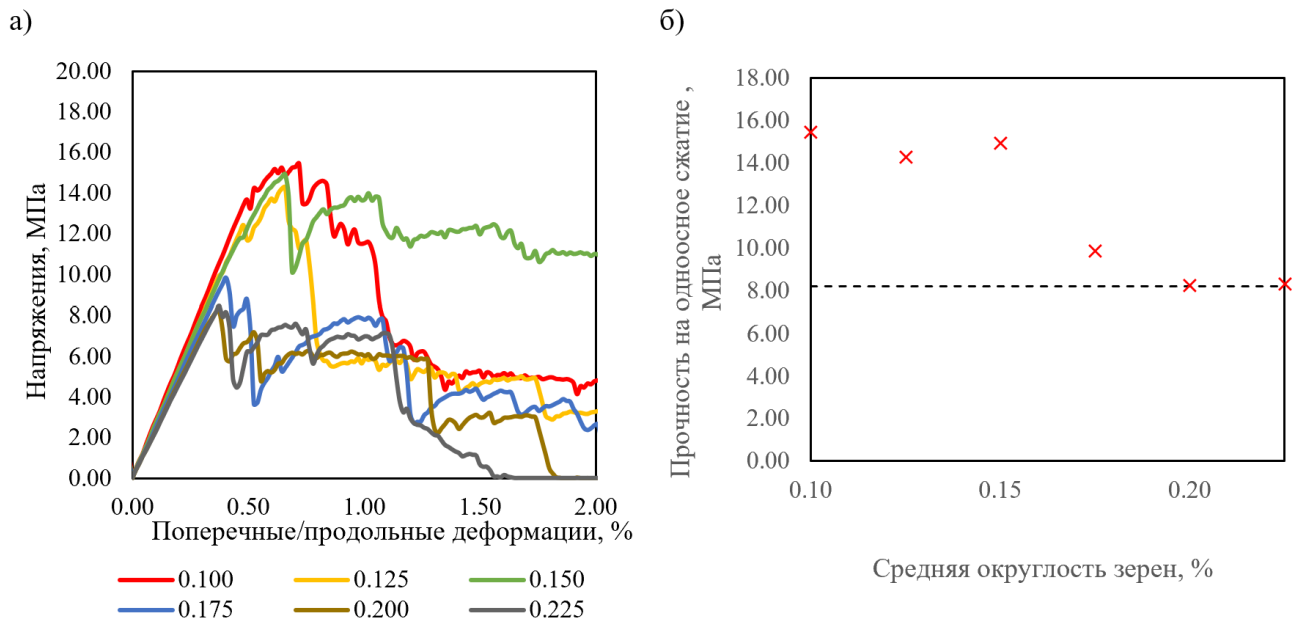


Рисунок 24 – Влияние степени округлости: а) кривые деформирования при одноосном сжатии образцов с разной степенью округлости, б) зависимость прочности образцов от средней округлости зерен (составлено автором)

Анализ данных выявил четкую корреляцию между степенью округлости зерен и прочностью на одноосное сжатие. При минимальной округлости (0.100) прочность достигает максимума — 16 МПа, что связано с равномерным распределением напряжений между гладкими поверхностями зерен. По мере увеличения угловатости наблюдается нелинейное снижение прочности. Критическим значением становится округлость 0.200, при которой прочность резко падает до 8 МПа, после чего стабилизируется на уровне около 8.2 МПа (0.220).

Гладкая форма округлых зерен (0.100–0.175) способствует скольжению частиц относительно друг друга, что приводит к пластической деформации. На диаграмме напряжений это проявляется в виде протяженного участка пластического течения с постепенным

накоплением микроповреждений. Разрушение происходит через образование диффузных трещин, что объясняет пологий спад прочности после достижения пика. В случае угловатых зерен (≥ 0.2) острые грани и неровности создают локальные концентрации напряжений, провоцируя быстрое зарождение магистральных трещин, распространяющихся по межзеренным границам. На графике это отражается крутым нисходящим участком после максимума напряжений, характерным для хрупких материалов. При округлости выше 0.2 дальнейшее увеличение угловатости не усиливает хрупкость, так как механизм разрушения уже полностью доминирует. Помимо формы, важную роль играет распределение размеров зерен.

Результаты исследования имеют важное прикладное значение, включая прогнозирование устойчивости соляных массивов, оптимизацию искусственных материалов с заданной микроструктурой для управления их пластичностью и прочностью, а также интерпретацию лабораторных данных с учетом морфологии зерен. Установленная зависимость подтверждает, что микроструктурные параметры зерен — форма, размер, распределение — являются критическими факторами, определяющими макромеханическое поведение соляных пород. Виртуальные испытания не только раскрыли физику процессов деформации, но и предоставили количественные критерии для инженерных расчетов. Это открывает новые возможности для проектирования сооружений, где учет морфологии зерен становится ключевым элементом при моделировании механического отклика пород в условиях реальных нагрузок.

3.4 Выводы по Главе 3

В рамках данной главы проведён комплексный численный анализ, направленный на исследование механического поведения поликристаллической структуры каменной соли с учётом микроструктурных особенностей. Разработанный подход основывается на явной геометрической реконструкции зеренной структуры с использованием метода тесселяции Вороного, что позволило реализовать реалистичное представление внутреннего строения материала и отслеживать процессы деформирования и разрушения на уровне межзеренных взаимодействий.

Проведённые виртуальные испытания различных типов (одноосное и трёхосное сжатие, бразильское растяжение) показали высокую степень сходимости с экспериментальными данными как по прочностным характеристикам, так и по форме диаграмм «напряжение–деформация». Это позволяет утверждать, что модель способна достоверно описывать как макроскопические параметры прочности соляных пород, так и механизмы разрушения, формирующиеся на уровне отдельных зерен.

Кроме того, в ходе численных исследований была выявлена ключевая роль геометрических и структурных характеристик зёрен в формировании общего отклика материала.

Установлено, что угловатость кристаллов оказывает заметное влияние на снижение прочности: по мере увеличения степени угловатости возрастает концентрация локальных напряжений и повышается склонность к разрушению по границам зёрен. Таким образом, форма и распределение зёрен непосредственно определяют сценарий разрушения породы.

Отдельное внимание было уделено масштабному эффекту. В результате численных серий испытаний установлено, что существует минимальный размер образца и соответствующее количество зёрен, начиная с которого влияние конкретной микроструктурной реализации становится статистически несущественным. Это позволяет использовать такие образцы в качестве репрезентативных элементов объема при моделировании реальных инженерных задач. На основании выполненного анализа можно заключить следующее:

- **Доказано**, что формирование поликристаллической структуры методом тесселяции Вороного позволяет не только качественно и количественно описывать процесс деформирования на макроструктурном уровне, но и получать достоверный отклик поликристаллической структуры соляных пород на внешние воздействия.

- **Установлено**, что характер распределения, форма и размер различных фракций в объёме поликристаллических элементов (зёрен) определяют характер деформирования и разрушения соляных пород. В частности, при увеличении степени угловатости кристаллов наблюдается снижение прочности образцов, что связано с формированием локальных зон концентрации напряжений и преждевременным разрушением вдоль границ зёрен.

Таким образом, в главе сформирована научно обоснованная методология численного моделирования поликристаллических солей, учитывающая микроструктурные характеристики и масштабные эффекты, что обеспечивает высокий уровень достоверности при прогнозировании их прочностного поведения.

ГЛАВА 4 ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-ДИСКРЕТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ

Современные задачи геомеханики характеризуются высокой степенью сложности, обусловленной необходимостью описания поведения горных пород в условиях разрушения, потери сплошности, образования и развития трещин, а также взаимодействия между отдельными фрагментами массива. Классические численные методы, такие как метод конечных элементов, хорошо подходят для моделирования непрерывной деформации, однако их возможности существенно ограничены при переходе к стадиям разрушения, особенно если необходимо учитывать явные контактные взаимодействия, перераспределение напряжений и движение отдельных блоков.

В этих условиях всё большее внимание привлекают гибридные методы моделирования, позволяющие учитывать как сплошные, так и дискретные аспекты поведения массивов. Одним из таких методов является конечно-дискретный подход, сочетающий элементы традиционного континуума с возможностью представления массива в виде совокупности взаимодействующих фрагментов. Данный подход позволяет более точно воспроизводить механизмы разрушения, отслеживать появление и развитие трещин, а также моделировать процессы отслоения, сдвига и обрушения, что особенно важно при анализе устойчивости подземных сооружений и массивов, находящихся в сложном напряжённом состоянии.

Цель данной главы — обосновать применимость конечно-дискретного подхода к типичным задачам инженерной геомеханики, определить области его эффективного использования, а также продемонстрировать возможности метода на конкретных численных примерах. Особое внимание будет уделено сравнению с традиционными методами, выявлению преимуществ подхода, а также ограничений, связанных с его вычислительной трудоёмкостью и масштабируемостью. В ходе анализа будет показано, что данный метод может выступать в качестве надёжного инструмента для моделирования разрушения и последующего взаимодействия породных массивов в условиях как техногенного, так и природного воздействия.

4.1 Обоснование применения предложенного подхода

Конечно-дискретный подход представляет собой перспективное направление в области вычислительной геомеханики, сочетающее достоинства метода конечных элементов (КЭ) и метода дискретных элементов (DEM). Его ключевое преимущество заключается в способности одновременно моделировать как сплошные деформации материала, так и процессы разрушения, образования новых контактных поверхностей, смещения и взаимодействия между отдельными фрагментами разрушенной среды. Такой подход оказывается особенно эффективным в задачах, где важно учитывать переход материала из сплошного состояния в дискретное,

сопровожающийся перераспределением нагрузки, формированием трещин, отслоений и последующим обрушением.

На текущем этапе развития метода его широкомасштабное применение ограничено высокой вычислительной нагрузкой, особенно при решении пространственных (3D) задач с высокой степенью детализации. Полноценное трёхмерное моделирование требует значительных ресурсов и продолжительного времени расчёта, что пока делает его ограниченно применимым в инженерной практике. В этой связи целесообразно сосредоточить внимание на **двумерных (плоских) постановках**, в рамках которых удаётся сохранить баланс между реализмом моделирования и доступностью вычислений.

Применение конечно-дискретного подхода в двумерной постановке позволяет решать широкий круг прикладных задач, в том числе:

- моделирование деформирования и разрушения целика в условиях камерной системы разработки, включая образование и развитие трещин, перераспределение напряжений, контактные взаимодействия и формирование зон обрушения;
- определение характера деформирования стенок скважины в условиях гидростатического напряжённого состояния, а также при наличии тектонических и техногенных возмущений;

Особенно важно отметить, что предложенный подход позволяет в явной форме разделять зоны развития трещин от зон активного разрушения, отслоения и обрушения. Это создаёт принципиально новое качество в интерпретации расчётных данных: становится возможным не только определить, где возникают повреждённые участки, но и локализовать области, где происходит потеря несущей способности с последующим смещением и контактным взаимодействием фрагментов. Такой уровень детализации существенно превосходит возможности классических КЭ моделей, где разрушение чаще всего описывается условно и требует априорного задания поверхностей трещин.

Таким образом, конечно-дискретный подход на современном этапе предоставляет эффективный инструмент для решения локальных и среднеразмерных геомеханических задач, особенно в условиях, когда требуется реалистично отразить процессы повреждения, потери связности и взаимодействия между разрушенными частями массива. Его применение открывает новые возможности в прогнозировании устойчивости подземных сооружений, оценки работоспособности целиков и разработки мер противоаварийной защиты при эксплуатации месторождений в сложных геомеханических условиях.

4.2 Определение характера деформирования ленточного целика в плоской постановке

Одной из приоритетных задач геомеханики при подземной разработке месторождений является оценка устойчивости и характера деформирования ленточных (узких) целиков, оставляемых между выработанными пространствами. Целики играют ключевую роль в перераспределении нагрузок, восприятии давления перекрывающих пород и обеспечении общего равновесия массива. При этом процессы разрушения внутри целика нередко сопровождаются образованием локальных трещин, отслоений и даже полным обрушением отдельных участков, что требует применения моделей, способных описывать такие явления на детализированном уровне.

В рамках данной работы рассматривается задача определения характера деформирования ленточного целика в условиях плоской постановки, что позволяет с достаточной точностью и в то же время с минимальными затратами ресурсов воспроизвести ключевые механизмы поведения породы. Использование конечно-дискретного подхода в этом контексте даёт возможность отразить сложную эволюцию напряжённо-деформированного состояния: от начальной упругой реакции до образования трещин, развития пластических зон, формирования отслоений и последующего контактного взаимодействия между разрушенными фрагментами массива.

При моделировании целик рассматривается как поликристаллическая структура с явно заданными зёрнами и межзёренными контактами. Такая постановка позволяет учитывать как неоднородность прочностных характеристик, так и вероятность локализации разрушения в зонах с пониженной связностью. Путём варьирования нагрузки и условий контакта между породой и выработкой моделируется поведение целика при различных сценариях: от стабильного состояния до полной потери несущей способности.

Особенностью конечно-дискретного моделирования является возможность выявления и разделения различных стадий разрушения: начального трещинообразования, локального смятия, отслоения фрагментов от границ выработки и явного обрушения с последующим взаимным смещением блоков. Такой уровень детализации позволяет не только оценить момент и место потери устойчивости, но и проследить, как изменяется структура поля напряжений и контактных взаимодействий в процессе разрушения.

4.2.1 Постановка задачи

Для определения влияния геометрических параметров на характер деформирования и устойчивость ленточного целика в условиях подземной отработки пластов полезных ископаемых сформулирована задача сравнительного анализа поведения целика при различных соотношениях сторон, с использованием двух подходов: конечно-дискретного и классического континуального моделирования.

В рамках исследования рассматривается плоская модель, представляющая собой участок массива, содержащего изолированный ленточный целик, расположенный между двумя пустотами (выработками). Целик моделируется как прямоугольная область с изменяемым соотношением высоты к ширине (H/L), что позволяет оценить влияние относительных размеров на устойчивость конструкции (рисунок 25).

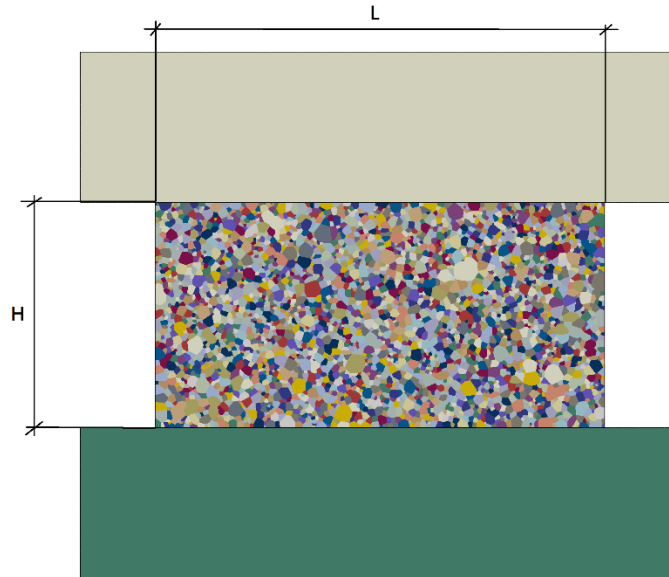


Рисунок 25 – Геометрия численной модели (составлено автором)

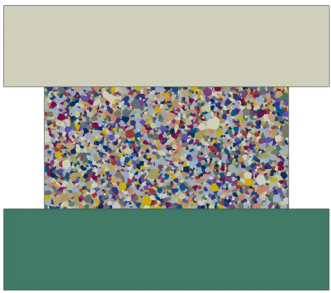
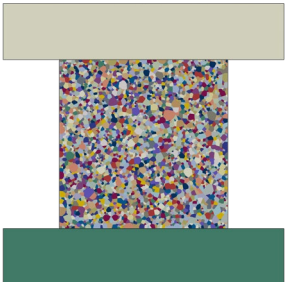
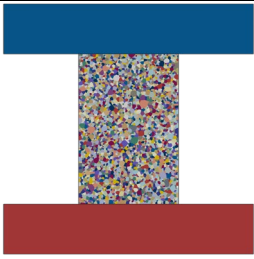
Боковые и нижние границы модели рассматриваются как жёсткие или симметричные, верхняя граница нагружается равномерным вертикальным давлением, моделирующим вес вышележащих пород. Задача решается в двух постановках:

Конечно-дискретная модель реализуется с использованием явно заданной зеренной структуры, сформированной методом тесселяции Вороного. Каждое зерно рассматривается как отдельный элемент, связанный с соседними посредством контактных связей. При достижении предельных условий прочности в контактах происходит их разрушение с последующим перераспределением напряжений и возможным смещением фрагментов. Это позволяет воспроизводить стадии формирования и развития трещин, локальные отслоения, сдвиги и обрушение участков массива. Такой подход обеспечивает реалистичное моделирование поведения породы в условиях, близких к хрупкому разрушению.

Классическая модель сплошной среды строится на основе пластической модели Мора–Кулона с учётом прочностных характеристик материала: сцепления, угла внутреннего трения и модуля упругости. Разрушение описывается через достижение предельного напряжения по критерию, с последующим формированием пластических зон. В данной постановке трещины не формируются явно, а отображаются через области пластической деформации и падение прочности.

Для сравнения поведения системы моделируются целики с различными соотношениями высоты к ширине, например: 1:2, 3:4, 1:1 и др. (Таблица 4).

Таблица 4 - Геометрия моделируемых целиков (составлено автором)

Ширина, м	Высота, м	H\L	Геометрия модели
6.0	3.0	0.50	
4.0	3.0	0.75	
3.0	3.0	1.00	
2.4	3.0	1.25	
2.0	3.0	1.50	

Такое сопоставление позволяет выявить преимущества конечно-дискретного подхода в части реалистичного описания механизма разрушения, включая возможность отслеживания образования трещин, их распространения, отслоений и контакта между отдельными частями разрушенной структуры. Построенная модель создаёт основу для последующего анализа влияния

геометрии целика и микроструктурных особенностей на его несущую способность, что критически важно при проектировании параметров системы разработки.

4.2.2 Расчетная схема

Для проведения сравнительного анализа поведения ленточного целика в различных численных постановках была сформирована расчетная схема (рисунок 26).

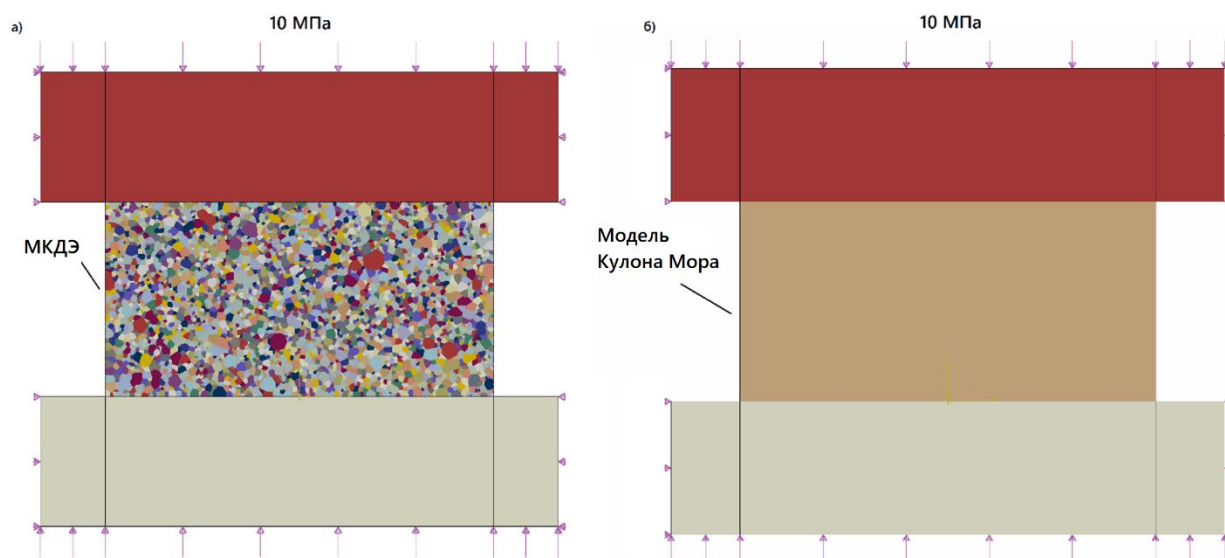


Рисунок 26 – Расчетная схема: а) модель на основе МКДЭ и тесселяции Вороного, б) модель на основе механики сплошной среды (составлено автором)

Модель включает два варианта расчёта:

а) модель, реализованная с использованием конечно-дискретного подхода (МКДЭ) и тесселяции Вороного,

б) классическая модель сплошной среды, построенная на основе механики разрушения по критерию Кулона–Мора.

Обе модели имеют идентичные габариты и граничные условия, что обеспечивает корректность сравнения. Центральным элементом модели является ленточный целик, расположенный между двумя пустотами, моделирующими выработанное пространство. Над и под целиком расположены контактирующие блоки, выполняющие роль массива вмещающих пород. Верхняя граница модели нагружается равномерным вертикальным давлением величиной 10 МПа, что имитирует горное давление, передающееся от вышележащих пород. Боковые границы жёстко ограничены в горизонтальном направлении, нижняя граница закреплена по вертикали.

В модели **а)** целик представлен в виде поликристаллической структуры, построенной методом тесселяции Вороного, что позволяет явно задать форму, размеры и расположение зёрен. Между зёрнами реализованы контактные связи, способные разрушаться при достижении предельных условий прочности. Такой подход обеспечивает возможность моделирования

трещинообразования, отслоений и контактных взаимодействий между фрагментами в процессе разрушения.

В модели **б)** целик моделируется как однородная сплошная среда с использованием механики разрушения по модели Кулона–Мора. Поведение материала описывается упруго-пластической моделью с параметрами сцепления, углом внутреннего трения и предельной деформацией. Разрушение в данной постановке трактуется как превышение прочностного предела, при котором в среде формируются зоны пластической деформации. При этом трещины не описываются явно, а лишь имитируются через локальные участки потери прочности.

Расчетная схема позволяет оценить поведение целика при различных соотношениях сторон и сравнить два подхода по ряду критериев: форма и развитие зон разрушения, распределение напряжений, момент потери устойчивости, характер контактных взаимодействий и траектории трещинообразования. Полученные результаты дадут возможность объективно оценить преимущества и ограничения конечно-дискретного подхода при моделировании деформирования и разрушения геологических тел в условиях ограниченного объема породы, как это имеет место при камерной системе обработки.

4.2.3 Результаты

В результате численного моделирования поведения ленточного целика с использованием конечно-дискретного подхода и модели Кулона–Мора получены как качественные, так и количественные оценки характера деформирования и разрушения породы при различных соотношениях высоты к ширине целика (H/L). Основное внимание было уделено выявлению зон локального разрушения и их зависимости от геометрических параметров целика.

В работе представлена последовательность изображений (рисунок 27), иллюстрирующих процесс деформирования ленточного целика в ходе численного моделирования при постепенном увеличении внешней нагрузки. Модель выполнена с использованием конечно-дискретного подхода, позволяющего детально отслеживать процессы разрушения и локализации деформаций. Каждое изображение соответствует определённому проценту от полной расчётной нагрузки (от 0 % до 100 %), что позволяет наглядно проследить эволюцию состояния массива на различных стадиях нагружения.

На этапе 0 % и 5 % целик находится в упругом состоянии, деформации практически отсутствуют, внутренняя структура не нарушена. При 10–20 % от полной нагрузки в краевых зонах начинают проявляться первые признаки трещинообразования, что связано с концентрацией напряжений у границ контактирования целика с соседними породами. К 40 % и 60 % нагружения наблюдается активное развитие зон трещинообразования и отслоения. Формируются локализованные участки с потерей связности, особенно вблизи боковых границ,

где трещины распространяются по межзеренным контактам, характерным для хрупкого разрушения. На стадиях 80 % и 100 % нагрузка достигает критического уровня, и процесс разрушения приобретает явно выраженный характер.

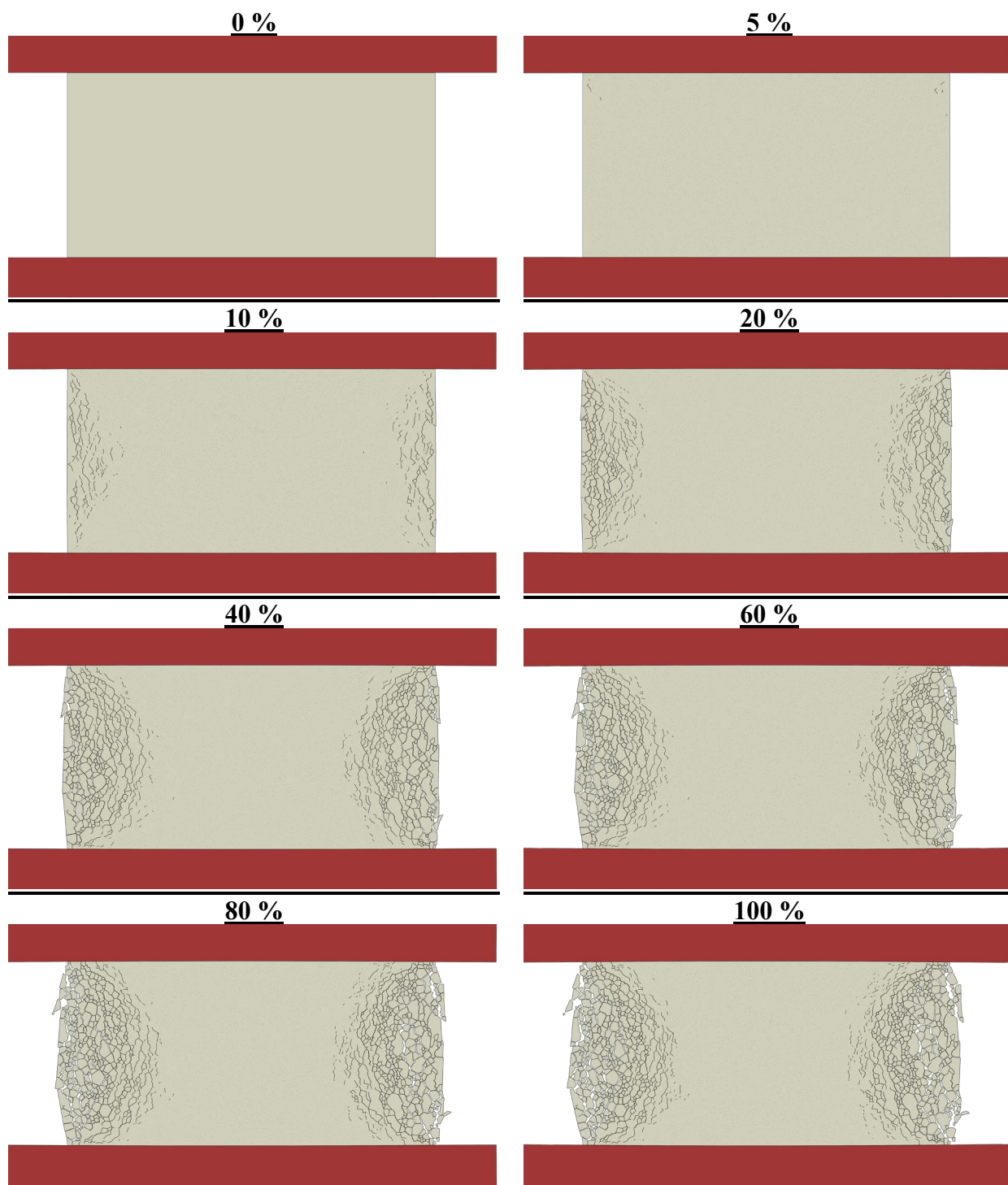


Рисунок 27 – Процесс деформирования ленточного целика по мере приложения нагрузки
(составлено автором)

Зоны отслоения расширяются, отдельные фрагменты начинают смещаться и выходить из общего контура целика. Возникают признаки дилатансии, сопровождающиеся увеличением объема вследствие расхождения фрагментов, что хорошо соответствует физическим наблюдениям в натурных условиях

Рисунок наглядно демонстрирует последовательную реализацию механизмов разрушения — от локального трещинообразования до обширного отрыва и перемещения блоков, что невозможно отразить при использовании классических континуальных моделей. Это подчёркивает важность применения конечно-дискретного подхода при анализе устойчивости целиков, позволяющего фиксировать реальные сценарии потери несущей способности материала с высокой степенью детализации.

В качестве результатов представлен сравнительный анализ результатов двух подходов (рисунок 28).

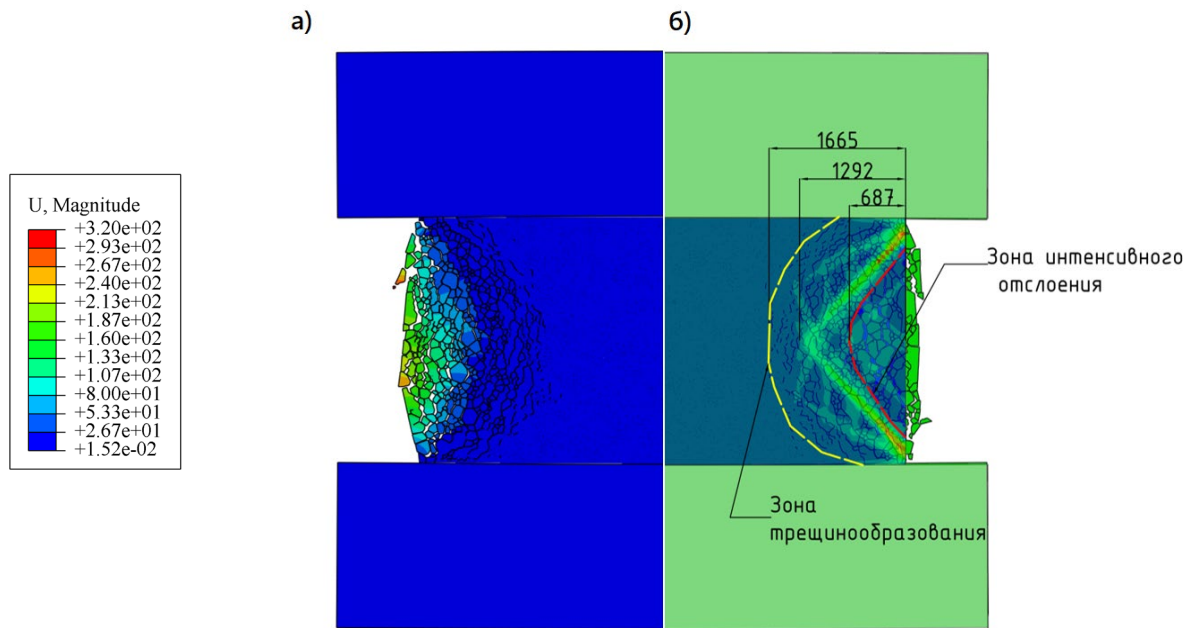


Рисунок 28 – Сравнительный анализ результатов: а) эпюра полных смещений, б) наложение эпюры пластических деформаций по Мору-Кулону на общую картину деформирования МКДЭ (составлено автором)

Изображение а) демонстрирует эпюру полных перемещений, полученную при использовании конечно-дискретной модели с тесселяцией Вороного. Чётко прослеживаются две зоны: внутренняя зона трескания (трещинообразования) и внешняя зона интенсивного отслоения — разрушенные фрагменты смещаются и частично теряют контакт с основным массивом. Образование таких зон связано с микромеханическим поведением зерен и контактных связей между ними. Благодаря этому, конечно-дискретная модель позволяет воспроизводить развитие разрушения, приближенное к естественным процессам, с чётким разделением стадий трещинообразования и последующего смещения фрагментов.

Изображение б) показывает наложение зоны пластических деформаций, полученной с использованием критерия Мора–Кулона, на картину разрушения, смоделированную с помощью МКДЭ. Анализ показывает, что зона разрушения, формируемая в модели МКДЭ, имеет существенно большую протяжённость, чем соответствующая зона в модели Кулона–Мора. При

этом размер зоны трещинообразования, выделенной по результатам МКДЭ, превышает аналогичную зону, полученную по критерию Кулона–Мора, в среднем на 28 %. Это связано с тем, что классическая модель сплошной среды не позволяет в полной мере учитывать микроструктурные особенности и развитие трещин между зёрнами, ограничиваясь лишь зоной накопления пластической деформации без явного отрыва и перемещения фрагментов. Таким образом, конечно-дискретный подход даёт более детализированную и физически обоснованную картину разрушения, позволяя чётко отделять зоны зарождения микроповреждений от зон последующего динамического обрушения.

Также представлена зависимость размеров зон разрушения от соотношения высоты к ширине целика (H/L) (рисунок 29).

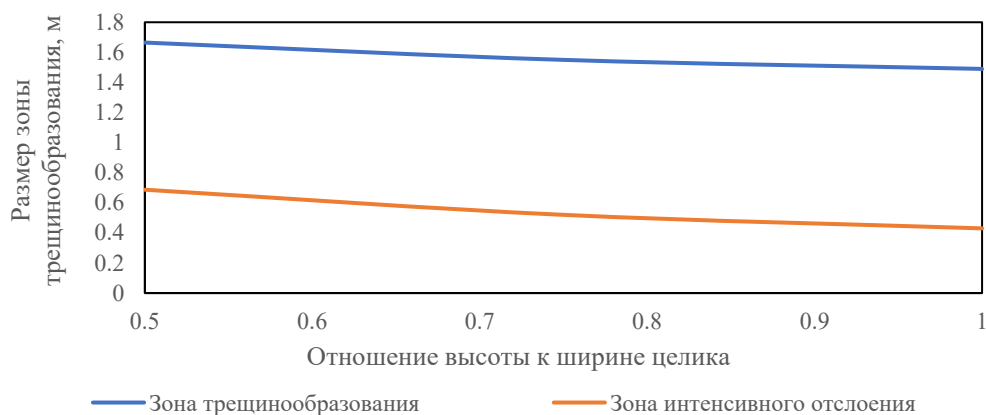


Рисунок 29 – Влияние соотношения H/L на размер зоны трещинообразования (составлено автором)

По мере увеличения данного соотношения наблюдается плавное снижение размеров обеих зон — трещинообразования и интенсивного отслоения. Это отражает перераспределение напряжений: более вытянутые (высокие) целики работают более устойчиво, в них снижается концентрация напряжений у краевых участков, что уменьшает масштаб развивающегося разрушения. В то же время, важным выводом является тот факт, что отношение между размерами зоны интенсивного отслоения и зоны трещинообразования остаётся практически постоянным при изменении геометрии целика. Это свидетельствует о структурной стабильности механизма разрушения: вне зависимости от абсолютных размеров целика, процесс сначала включает накопление микроповреждений в толще массива, а затем развитие локального отрыва и смещения внешних фрагментов.

Таким образом, результаты моделирования показали, что конечно-дискретный подход обладает высокой чувствительностью к геометрии объекта и позволяет не только воспроизвести реалистичные сценарии разрушения, но и выделить устойчивые соотношения между характерными зонами разрушения, которые могут быть использованы для прогноза

устойчивости целиков и разработки критериев допустимых геометрических параметров при проектировании систем подземной отработки.

4.3 Определение характера деформирования стенок скважины в условиях гидростатического напряженного состояния

Рассмотрим характер деформирования породного массива в окрестности выработки кругового очертания, а именно скважины диаметром 100 мм. Даже в условиях идеализированного симметричного нагружения — при равномерном всестороннем давлении — вблизи стенок скважины могут развиваться локализованные зоны повреждений, трещинообразования, отслоения и смещения фрагментов породы. Эти процессы критически важны для оценки долговечности и безопасной эксплуатации скважин.

В настоящем разделе рассматривается задача определения характера деформирования стенок скважины в условиях гидростатического напряжённого состояния, которое принято в качестве базовой схемы нагружения. Такая постановка позволяет сосредоточиться на внутренней реакции материала и исключить влияние сложных граничных условий или тектонических напряжений. Однако даже в этих упрощённых условиях механическое поведение массива может быть крайне неоднородным и неочевидным, особенно в случае трещиноватых или поликристаллических пород.

С целью объективной оценки механического отклика породы в зоне стенки скважины в данном разделе будет проведён сравнительный анализ двух численных подходов: Классического континуального подхода, основанного на модели сплошной среды с разрушением по критерию Кулона–Мора, и конечно-дискретного подхода, в котором структура массива воспроизводится на уровне отдельных зерен с явным моделированием межзеренных взаимодействий и разрушений.

Такой подход позволяет оценить, насколько контрастно отличаются результаты моделирования в зависимости от используемой модели, и насколько важно учитывать микроструктуру среды при решении задач устойчивости скважин. Особое внимание будет уделено способности моделей выявлять зоны трещинообразования, дилатансии, отслоения и контактного взаимодействия разрушенных фрагментов. Это создаёт обоснованную платформу для последующего применения метода в более сложных инженерных задачах, приближённых к реальным условиям эксплуатации скважин в геологических средах с высоким риском неустойчивости.

4.3.1 Постановка задачи

Для анализа механического отклика породного массива вокруг скважины в условиях всестороннего сжатия была сформирована расчётная модель (рисунок 30).

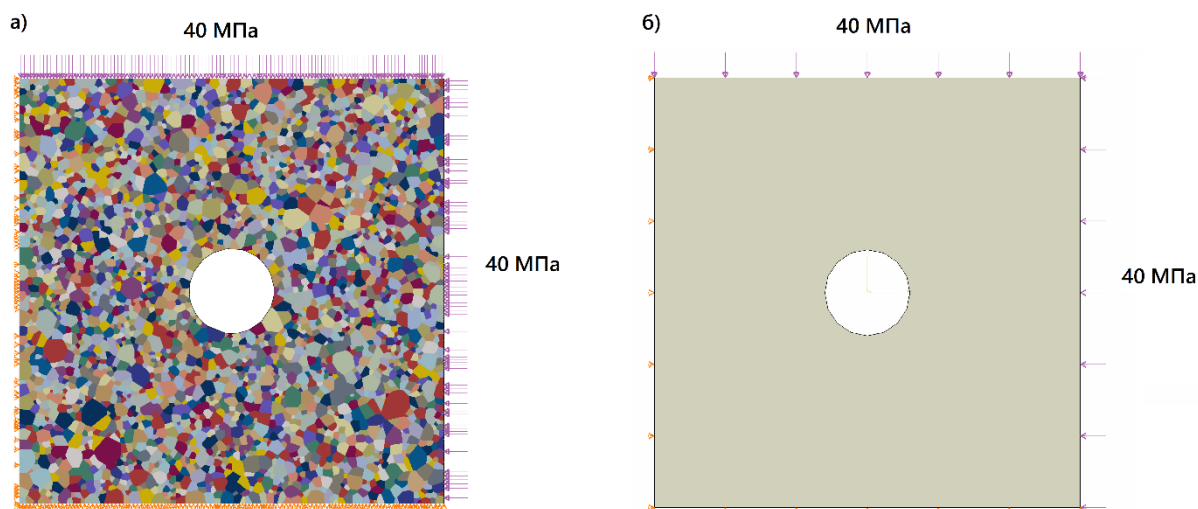


Рисунок 30 – Расчетная схема: а) модель на основе МКДЭ и тесселяции Вороного, б) модель на основе механики сплошной среды (составлено автором)

Модель используется для сравнительного численного исследования двух различных подходов: конечно-дискретного (МКДЭ) и классического континуального (метод сплошной среды на основе критерия Кулона–Мора).

Моделируемый участок массива представляет собой квадратную область с центральным круглым отверстием, имитирующим вертикальную скважину. Размер модели выбран таким образом, чтобы исключить влияние граничных эффектов, а геометрия оставалась симметричной относительно центра полости. Радиус отверстия и габариты модели подобраны в соответствии с типичными инженерными условиями, что обеспечивает физическую реалистичность результатов. Рассмотрим два варианта моделей:

а) Модель на основе конечно-дискретного подхода (МКДЭ), в которой структура массива формируется при помощи тесселяции Вороного. Каждое зерно рассматривается как отдельный фрагмент, связанный с соседними контактными элементами, обладающими заданными прочностными характеристиками и способными разрушаться при достижении критических условий. Данный подход позволяет отслеживать образование трещин, отслоений и движение отдельных кристаллов при разрушении.

б) Модель на основе механики сплошной среды с применением критерия прочности Мора–Кулона. Порода рассматривается как непрерывное, однородное тело, способное к пластической деформации. Разрушение описывается развитием зон пластичности, без явного отслеживания образования трещин и перемещения фрагментов.

4.3.2 Граничные условия

В нижней и левой границах модели ограничены ортогональные смещения. К верхней и правой границам модели приложено равномерно распределенное давление величиной 40 МПа,

что соответствует гидростатическому напряжённому состоянию, типичному для глубоких горизонтов или условий, где отсутствует выраженная тектоническая анизотропия. Это позволяет исключить влияние направленных нагрузок и сосредоточиться на особенностях взаимодействия материала с геометрией скважины.

Поставленная задача позволяет оценить и сравнить следующие аспекты двух подходов:

- характер распределения напряжений вокруг полости;
- локализацию зон разрушения;
- проявление дилатансии и объёмных деформаций;
- способность моделей воспроизводить трещинообразование и отслоение стенок скважины;

Таким образом, расчётная схема обеспечивает обоснованную и сопоставимую основу для анализа эффективности и прогностической способности двух численных подходов при моделировании поведения породного массива в условиях действия гидростатического напряжённого состояния.

4.3.3 Результаты

Прежде чем перейти к рассмотрению результатов численного моделирования, целесообразно отметить, что главной задачей данного исследования является выявление особенностей механического отклика поликристаллической среды в окрестности скважины при всестороннем сжатии. Для достижения этой цели были использованы расчётные модели, основанные на конечно-дискретном подходе, позволяющие детально проследить процессы локализованного разрушения, трещинообразования и перераспределения напряжений на уровне отдельных зерен. Такой подход обеспечивает не только высокую пространственную разрешающую способность, но и возможность визуального анализа макромеханизмов потери устойчивости, что особенно важно при изучении поведения материала в зонах концентрации напряжений, таких как стенки скважины. Далее приведены результаты моделирования, иллюстрирующие поэтапное развитие деформаций и разрушения вблизи полости, а также влияние микроструктуры на характер протекания этих процессов.

В результате численного эксперимента была выявлена эволюция разрушения массива вокруг скважины (рисунок 31) при равномерном всестороннем сжатии, смоделированная с использованием конечно-дискретного подхода (МКДЭ).

Верхний ряд изображений демонстрирует процесс трещинообразования в упрощённой визуализации — без отображения внутренних границ зёрен, что позволяет наглядно проследить геометрию и динамику раскрытия трещин. Нижний ряд изображений содержит ту же информацию, но с включённой визуализацией границ зерен, что позволяет установить

взаимосвязь между структурой поликристаллической среды и механизмами локального разрушения.

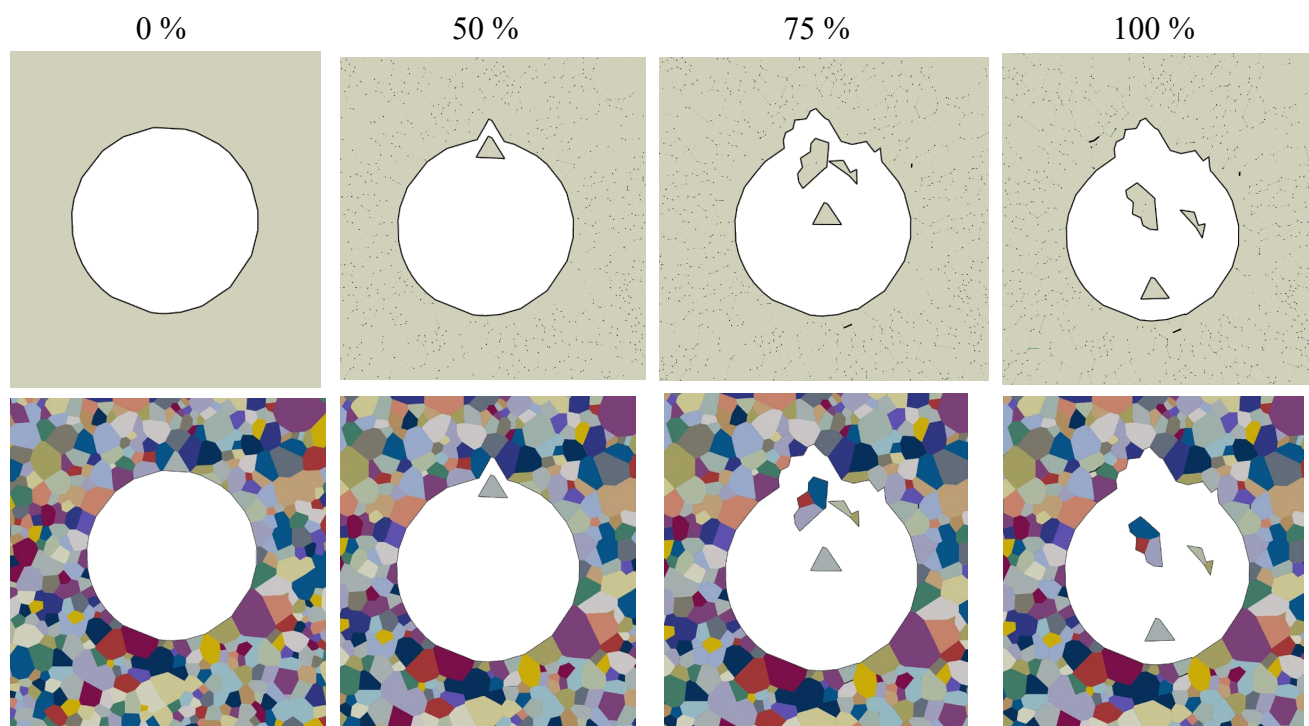


Рисунок 31 – Процесс развития трещин в окрестности скважины (составлено автором)

Каждая колонка изображений соответствует определённой доле от полной расчётной нагрузки: 0 %, 50 %, 75 % и 100 %. При нулевой нагрузке материал находится в исходном упругом состоянии, деформации отсутствуют. На стадии 50 % появляются первые локальные очаги разрушения — трещины начинают зарождаться вблизи стенки скважины, причём уже на этом этапе видно, что процесс носит асимметричный характер.

С дальнейшим ростом нагрузки (75–100 %) разрушение прогрессирует и распространяется в массив. Особенно отчётливо видно, что зоны трещинообразования концентрируются вдоль границ наиболее крупных зёрен. Границы между кристаллами выступают в роли естественных путей для локализации напряжений и инициации трещин, а крупные зёрна способствуют формированию направленных и глубоко распространяющихся зон разрушения. На поздней стадии (100 %) наблюдается образование замкнутых оторванных фрагментов и локальные области дилатансии, где зерна теряют контакт, формируя внутренние пустоты и объёмные деформации.

Таким образом, проведённое моделирование позволяет сделать важный вывод: даже при гидростатическом симметричном нагружении разрушение в поликристаллической среде развивается неравномерно, а его характер в значительной степени определяется структурной неоднородностью — формой, размером и положением зёрен. Деформации концентрируются вблизи границ крупных кристаллов, формируя асимметричные зоны трещинообразования и

дилатансии, что подчёркивает критическую важность учёта внутренней микроструктуры при оценке устойчивости стенок скважин и аналогичных геомеханических объектов.

Сравним процесс развития пластических деформаций в окрестности скважины при всестороннем сжатии (рисунок 32), смоделированный с использованием двух различных численных подходов: классической модели сплошной среды на основе критерия Кулона–Мора (слева в каждом блоке) и конечно-дискретного подхода (МКДЭ, справа).

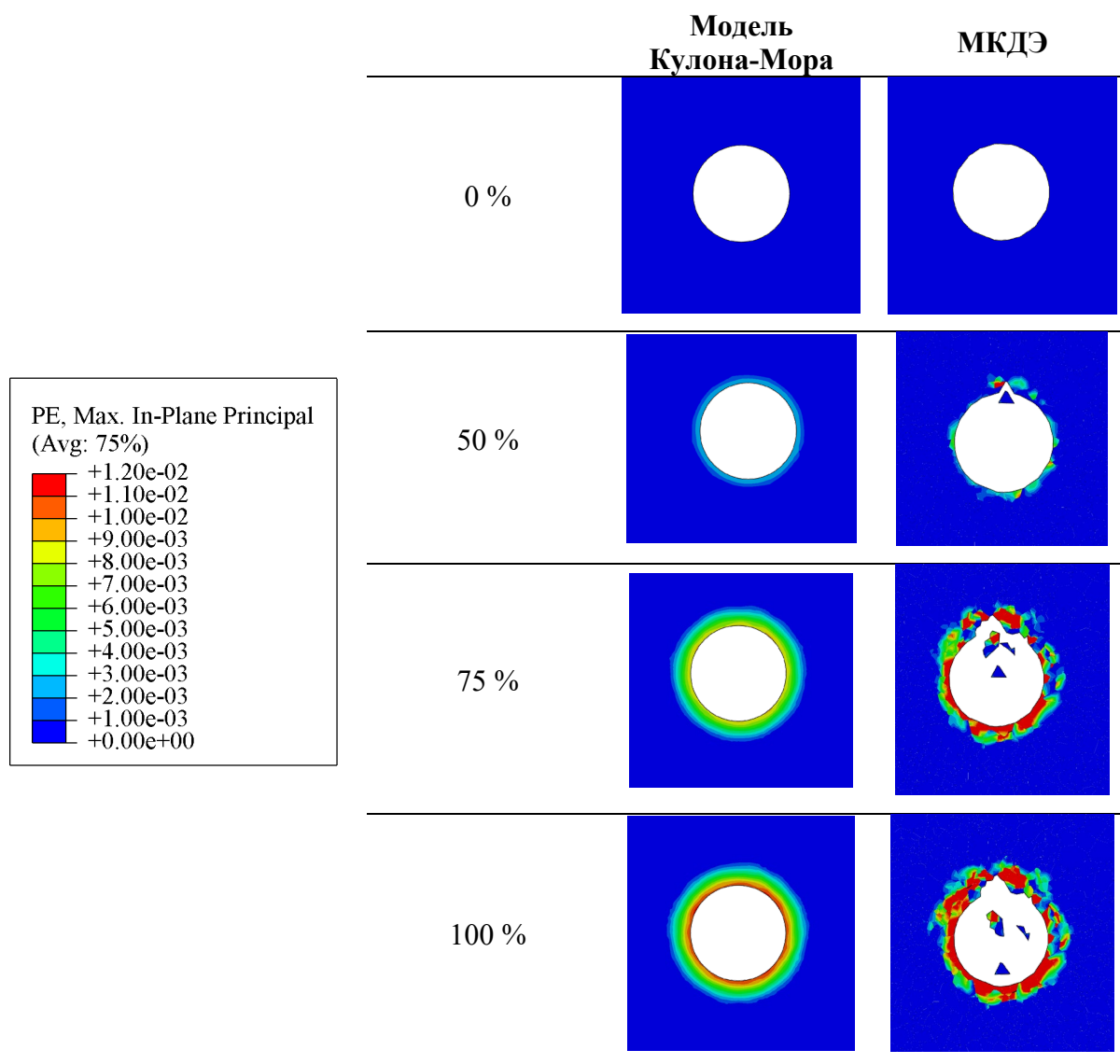


Рисунок 32 – Процесс развития пластических деформаций при различных подходах (составлено автором)

Каждая строка рисунка соответствует определённому уровню приложенной нагрузки: 0 %, 50 %, 75 % и 100 % от расчётного значения.

На начальном этапе (0 %) в обеих моделях наблюдается отсутствие пластических деформаций — скважина и окружающий массив находятся в упругом состоянии. При достижении 50 % нагрузки в модели Кулона–Мора появляется симметричная тонкая кольцевая зона, соответствующая началу пластического течения материала вокруг скважины. Эта зона

равномерно распределена по периметру полости и расширяется по мере увеличения нагрузки, сохраняя осевую симметрию. В модели МКДЭ уже на этом этапе наблюдаются асимметричные зоны локализации деформаций, формирующиеся вблизи отдельных участков границ зёрен. Это говорит о высокочувствительной реакции модели к внутренней микроструктуре материала.

При нагрузке в 75 % модель по Кулону–Мору демонстрирует хорошо очерченную симметричную кольцевую зону пластических деформаций, визуализированную в диапазоне от зелёного до красного цвета, что указывает на нарастающее напряжённо-деформированное состояние. В это же время в модели МКДЭ происходит интенсивное развитие локализованных пластических очагов, концентрирующихся в верхней части скважины и распространяющихся вдоль слабых связей между зёрнами. Наблюдается явная фрагментация окружающей структуры, а также начальные проявления дилатансии: отрыв и перемещение отдельных зёрен.

На завершающей стадии (100 %) различия между моделями достигают максимума. В классической модели происходит равномерное расширение кольцевой зоны пластичности, без выхода за пределы регулярной формы. В то время как в МКДЭ модель фиксирует многоочаговое разрушение с формированием несвязанных фрагментов и зон контактного взаимодействия между ними, выходящих далеко за пределы идеальной пластической оболочки. Такая картина отражает не только нарастающую нестабильность, но и возможность воспроизведения реальных микромеханизмов разрушения, включая отслоение, смещение и повторное перераспределение напряжений после потери целостности.

Таким образом, классическая континуальная модель способна отображать лишь усреднённую картину пластичности, сохраняющую симметрию и не учитывающую микроструктурные особенности среды. В то же время конечно-дискретный подход позволяет выявлять асимметричные, локализованные зоны деформации, обусловленные структурной неоднородностью материала, и воспроизводить более реалистичный сценарий разрушения стенок скважины.

По результатам численного анализа были локализованы зоны разрушения в окрестности скважины при всестороннем сжатии (рисунок 33). Изображение разделено на две части: а) — карта трещинообразования с отображением геометрических границ зоны потери устойчивости, б) — эпюра пластических деформаций в зернах, показывающая распределение интенсивности деформирования в массиве.

На фрагменте а) визуализирована структура трещиноватости, сформировавшаяся в процессе нагружения. Вокруг скважины выделяется зона трещинообразования, характеризующаяся началом разрушения контактных связей между зёрнами. Эта зона имеет выраженную асимметричную форму, преимущественно локализуясь в верхней части массива.

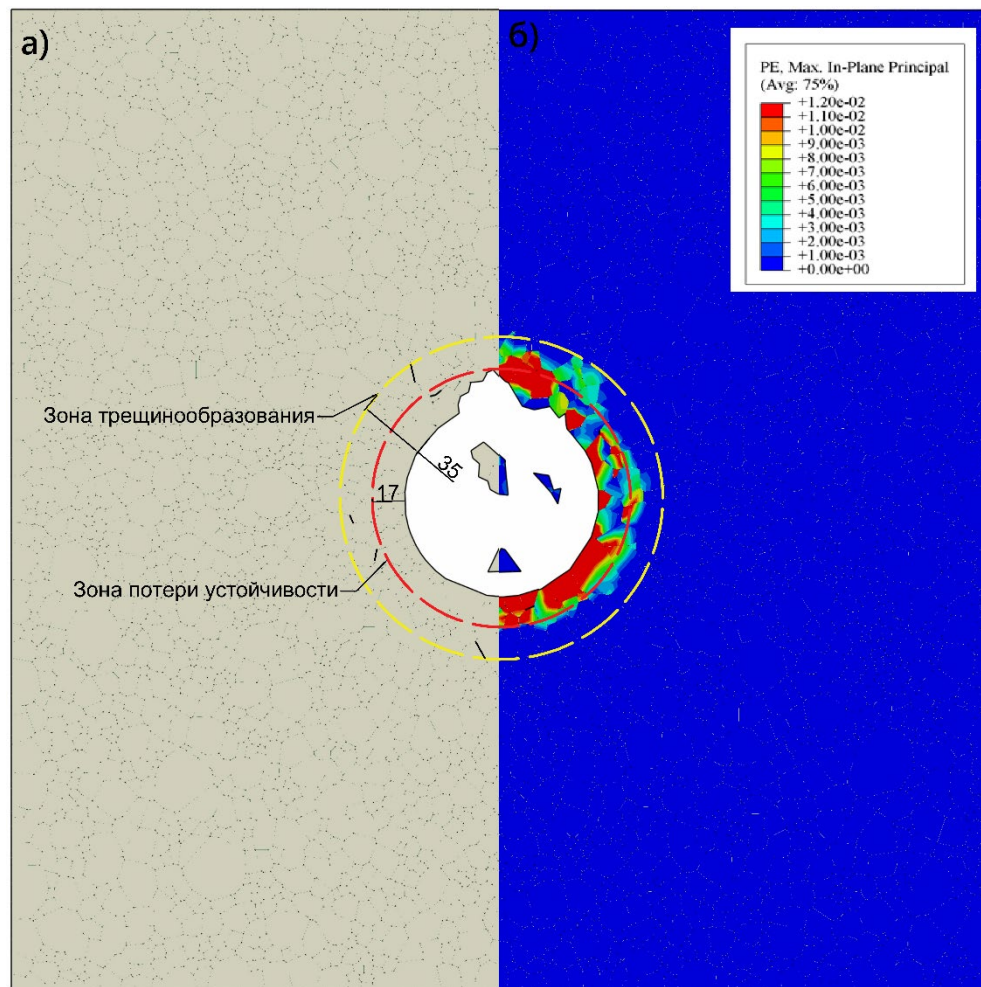


Рисунок 33 – Локализация нарушенной зоны в окрестности скважины: а) картина развития трещинообразования, б) эпюра развития пластических деформаций в зернах (составлено автором)

Внутри зоны трещинообразования выделена зона потери устойчивости, в пределах которой происходит отделение и смещение отдельных фрагментов породы. Размеры повреждённой области составляют от 17 до 35 мм от контура скважины, что соответствует глубине распространения повреждений на момент предельного состояния. Формирование этих зон тесно связано с микроструктурными особенностями среды — в частности, с положением и размерами крупных зёрен, вдоль границ которых и инициируются разрушения.

На фрагменте б) отображена эпюра максимальных главных пластических деформаций, показывающая степень вовлечённости зёрен в процесс деформирования. Хорошо прослеживается неравномерность распределения деформаций: деформационные очаги концентрируются неравномерно по периметру скважины, подтверждая влияние микроструктурной анизотропии. Зоны наибольшей пластичности совпадают с границами потери устойчивости, визуализированными на левой части изображения. Кроме того, в отдельных зонах наблюдаются кольцевые концентрические деформационные структуры, указывающие на локальные области перераспределения напряжений и дилатансионные процессы.

Таким образом, разрушение в окрестности скважины при гидростатическом нагружении развивается неравномерно и фрагментарно, в тесной связи с положением крупных зёрен. Зона трещинообразования и зона потери устойчивости имеют выраженную пространственную структуру и асимметрию, а максимальные пластические деформации концентрируются по их внешней границе.

4.4 Возможные области применения предлагаемого подхода

Конечно-дискретный подход, реализованный в данной работе на основе тесселяции Вороного и моделирования межзеренных взаимодействий, открывает широкие перспективы применения не только в классических задачах прочности и устойчивости, но и в ряде инженерно-геомеханических сценариев, где критическую роль играют процессы локального разрушения, дилатансии и контактной переработки структуры массива. Его уникальной особенностью является способность не просто зафиксировать факт разрушения, а разделить стадии трещинообразования, отслоения и утраты контактов между отдельными фрагментами породы, что обеспечивает новый уровень точности при оценке состояния геологических тел и сооружений.

Одним из важных направлений, в котором данный подход может быть востребован, является оценка несущей способности водозащитной или газоупорной толщи, расположенной между техногенными полостями и гидрогеологически активными горизонтами. Ключевым параметром в подобных задачах выступает не только прочность массива в целом, но и возможность образования и развития сквозных магистральных трещин, соединяющих выработанное пространство с зонами напорных вод. Классические континуальные методы неспособны достоверно отразить механизм формирования таких трещин, поскольку работают с усреднёнными параметрами. В то время как конечно-дискретный подход позволяет отследить образование и развитие трещин в естественных направлениях слабости — вдоль границ зёрен, фрагментов или дефектов, что даёт более реалистичную картину риска прорыва воды. Это особенно актуально при мониторинге состояния изолирующих пород вблизи соляных хранилищ, шахтных стволов, зон хранения радиоактивных или химически активных отходов, где нарушение герметичности приводит к экологическим и технологическим катастрофам.

Ещё одной потенциальной областью применения предлагаемого подхода является оценка устойчивости откосов и бортов карьеров в трещиноватых и слабоцементированных породах, где разрушение массива зачастую начинается не с общего сдвига, а с локальных отрывов и выпадений отдельных блоков. Конечно-дискретная модель позволяет воспроизвести формирование таких очагов локальной неустойчивости, учитывая геометрию естественных фрагментов массива и особенности их взаимодействия. Это создаёт возможности для

прогнозирования сценариев разрушения, оценки геометрии возможных обвалов и оптимизации параметров уступов.

Кроме того, данный подход может быть эффективно использован в гидромеханически связанных задачах, в которых необходимо учитывать влияние порового давления и фильтрационных потоков на прочность и целостность среды. В частности, при моделировании гидроразрыва или воздействия воды на ранее нарушенные зоны (например, обрушенные камеры), возможность явного моделирования потери контактов между зёрнами позволяет оценивать степень раскрытия трещин, их проницаемость и устойчивость. Это даёт возможность точнее оценивать условия, при которых трещины становятся проводящими или сохраняют изолирующие свойства, что важно для задач геотермального бурения, подземного хранения углекислого газа и разработки слоёв с низкой проницаемостью.

Отдельное внимание следует уделить задачам, связанным с оценкой последствий повторного горного давления или реинжиниринга ранее отработанных участков. В таких ситуациях остаточные напряжения, микроповреждения и существующие слабые зоны существенно влияют на поведение массива. Конечно-дискретное моделирование позволяет реконструировать не только текущее состояние породы, но и спрогнозировать её реакцию на повторное нагружение, включая повторную активацию ранее ослабленных зон или развитие новых трещин на базе старых структурных связей. Это создаёт дополнительную надёжность при планировании мероприятий по повторной отработке или переиспользованию подземных объектов.

Наконец, данный подход может быть полезен в научно-исследовательских задачах, направленных на изучение механики разрушения кристаллических и псевдосвязанных пород. Возможность явно моделировать взаимодействие отдельных зёрен, варьировать геометрию и прочностные параметры на микроуровне делает МКДЭ отличным инструментом для изучения структурных эффектов, масштабной чувствительности, а также влияния фракционного состава на прочностной отклик породы. Такие исследования важны для фундаментального понимания поведения горных массивов и разработки более обоснованных инженерных критериев прочности.

В целом, конечно-дискретный подход открывает возможности для решения как прикладных инженерных, так и научных задач, требующих учёта микроструктурных и контактных эффектов. Его использование позволяет перейти от усреднённого континуального описания к физически обоснованной модели разрушения, основанной на структурных механизмах, что особенно важно в условиях роста требований к точности прогноза устойчивости геосистем.

4.5 Выводы по Главе 4

Предложенный в исследовании подход позволяет учесть неоднородность и анизотропию соляного массива, принципиально отличаясь от классических методов механики сплошной среды, игнорирующих дискретную природу кристаллических агрегатов. В рамках исследования были решены две прикладные задачи:

В первой задаче, где исследовался процесс деформирования соляного целика под вертикальной нагрузкой, модель на основе FDEM выявила формирование сетки микросдвигов вдоль границ кристаллов, что привело к неравномерному распределению напряжений и прогрессирующей дилатансии. Пиковые нагрузки сопровождались лавинообразным разрушением межзерновых связей, тогда как классическая модель сплошной среды предсказывала плавное уплотнение и равномерное распределение деформаций.

Различие в результатах объясняется тем, что континуальный подход не учитывает концентрацию напряжений на границах кристаллов, которая служит очагом зарождения трещин.

Во второй задаче, где моделировалось поведение стенок скважины в соляном массиве при изменении давления, FDEM-модель продемонстрировала, что деформации концентрируются вблизи границ крупных зерен, формируя асимметричные зоны раскрытия трещин и дилатансии. В отличие от этого, континуальная модель показала равномерное радиальное смещение стенок без учета структурных неоднородностей. Важно, что в конечно-дискретном подходе дилатансия возникала на 20–30 % раньше, что связано с локальным нарушением сцепления между кристаллами — эффект, принципиально недостижимый в рамках теорий сплошной среды.

На основании полученных результатов можно заключить: характер и интенсивность смещений контура породных обнажений, а также дилатансионные процессы на участке, где ожидается запредельное деформирования солей следует определять в рамках конечно-дискретного подхода при рассмотрении массива в виде набора поликристаллических структур.

Таким образом, проведенное моделирование доказывает, что прогноз запредельного деформирования соляных массивов требует учета их поликристаллической структуры. Конечно-дискретный подход, сочетающий методы FDEM и тесселяции Вороного, обеспечивает высокую детализацию процессов на уровне зерен, что принципиально недостижимо в рамках механики сплошной среды. Результаты численного анализа продемонстрировали, что структурная неоднородность определяет не только характер деформаций, но и критически влияет на устойчивость инженерных объектов, что обосновывает необходимость использования дискретно-структурных моделей в проектировании сооружений в соляных толщах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы была разработана и реализована методология численного моделирования деформирования и разрушения соляных пород с учетом их поликристаллической структуры. Основное внимание было уделено применению конечно-дискретного подхода, позволяющего моделировать как сплошные, так и дискретные процессы в геомеханических системах. Проведённые исследования подтвердили эффективность предложенного подхода для решения прикладных задач, связанных с прогнозом устойчивости и оценкой механического состояния породного массива. На основании выполненной работы сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработана методика построения поликристаллической модели соли на основе тесселяции Вороного, позволяющая учитывать форму, размер, распределение и контактные взаимодействия зёрен. Подход обеспечил воспроизведение внутренней структуры массива, характерной для природных соляных пород.

2. Внедрена конечно-дискретная модель механического поведения соляных пород, учитывающая когезионные связи между зёрнами, разрушение контактов и последующее контактное взаимодействие разрушенных фрагментов. Это обеспечило возможность моделировать полный цикл разрушения: от начального трещинообразования до отрыва и перераспределения фрагментов.

3. Установлено, что предлагаемая модель позволяет достоверно описывать макромеханический отклик материала, включая стадии трещинообразования, дилатансии, отслоения и обрушения. Полученные в ходе виртуальных испытаний кривые «напряжение–деформация» и структура зон разрушения хорошо согласуются с результатами реальных экспериментов.

4. Показана высокая чувствительность механического отклика модели к параметрам прочности и деформации, таким как модуль упругости, сцепление, угол внутреннего трения, прочность межкристаллических связей и энергия разрушения. Это позволяет использовать подход как инструмент для обратной идентификации параметров соляных пород.

5. Выполнен анализ масштабного эффекта, показано, что начиная с определённого отношения площади зерна к общей площади образца (менее 0,05 %), влияние конкретной микроструктуры становится статистически незначимым. Это позволило обосновать размеры репрезентативного объема (REV) для надёжного численного моделирования.

6. Установлено, что увеличение угловатости зёрен приводит к снижению предельной прочности материала. Для образцов с высокой угловатостью прочность снижалась на 15–25 % по сравнению с моделями, содержащими зерна округлой формы при прочих равных условиях.

7. Проведён сравнительный анализ поведения ленточного целика в двух численных постановках — в рамках конечно-дискретного подхода и классической модели Мора–Кулона. Установлено, что МКДЭ позволяет не только точнее прогнозировать момент потери устойчивости, но и явно выделять зоны трещинообразования и отслоения, что невозможно в континуальной модели.

8. Показано, что зона трещинообразования в модели МКДЭ в среднем на 28 % шире, чем в модели Кулона–Мора, что связано с возможностью описания начального разрушения по границам зёрен и учёта локальных ослаблений.

9. Смоделировано поведение стенок скважины в условиях гидростатического сжатия, показано, что трещины инициируются вдоль границ крупных зёрен и формируют асимметричную зону разрушения, сопровождающуюся дилатансией. В классической модели такого эффекта не наблюдается.

10. Обоснованы возможные области применения конечно-дискретного подхода, включая: оценку устойчивости целиков, прогноз разрушения стенок скважин, моделирование поведения водозащитных и газоупорных толщ, задачи гидроразрыва пласта, сейсмостойкость и долгосрочную устойчивость подземных хранилищ.

11. Показано, что использование предложенной модели позволяет не только повысить точность расчётов, но и сформировать новую стратегию геомеханического моделирования, в основе которой лежит не усреднённая сплошная среда, а представление материала как взаимодействующей дискретной системы.

12. Результаты работы обладают практической ценностью и могут быть использованы в проектных расчётах, при мониторинге состояния выработанных пространств, а также при научных исследованиях, направленных на изучение процессов разрушения поликристаллических пород.

Полученные в ходе диссертационного исследования данные создают научную и методологическую основу для дальнейшего развития направлений по интеграции конечно-дискретных методов в инженерную геомеханику, а также для построения более точных и физически обоснованных моделей разрушения пород в условиях сложных техногенных и природных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барях, А.А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 33–46.
2. Карасев, М.А. Методические вопросы определения исходных параметров модели деформирования каменной соли как поликристаллической дискретной среды / М.А. Карасев, **В.В. Петрушин** // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2024. – № 9. – С. 47–64. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_47
3. Карасев, М.А. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне / М.А. Карасев, **В.В. Петрушин**, А.И. Рысин // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2023. – № 4. – С. 48–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48
4. Кашников, Ю.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения / Ю.А. Кашников, А.О. Ермашов, А.А. Ефимов // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 259–267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259.
5. Коршунов, В.А. Новый способ определения предела прочности при растяжении горных пород / В.А. Коршунов, Ю.М. Карташов // Записки Горного института. – 2011. – Т. 190. – С. 202–206.
6. Коршунов, В.А. Определение показателей паспорта прочности горных пород методом разрушения образцов сферическими инденторами / В.А. Коршунов, Ю.М. Карташов, В.А. Козлов // Записки Горного института. – 2010. – Т. 185. – С. 41–45.
7. Павлович, А.А. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом / А.А. Павлович, В.А. Коршунов, А.А. Бажуков, Н.Я. Мельников // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 502–509. – DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502.
8. Протосеня, А.Г. Анализ подходов к прогнозу напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, А.М. Катеров, **В.В. Петрушин** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство – 2023. – № 19. – С. 129–137. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-129-137
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619605 Российская Федерация. Программа для внедрения когезионных элементов в сетку сплошных элементов первого порядка в Abaqus CAE. Заявка № 2023619605: заявл. 27.04.2023: опубл. 12.05.2023 /**Петрушин В.В.**, Карасев М.А.; заявитель федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

10. Alkan, H. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests / H. Alkan, Y. Cinar, G. Pusch // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2007. – Vol. 44, No. 1. – P. 108–119. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.05.003

11. Alpers, A. Generalized balanced power diagrams for 3D representations of polycrystals / A. Alpers, A. Brieden, P. Gritzmam, A. Lyckegaard, H.F. Poulsen // *Philosophical Magazine*. – 2015. – Vol. 95, No. 9. – P. 1016–1028. – DOI: 10.1080/14786435.2015.1015469.

12. Atkinson, K. An introduction to numerical analysis / K. Atkinson. – 2nd ed. – New York : John Wiley & Sons, 1991. – 712 p. : ill. – ISBN 978-0471624890.

13. Bérest, P. Thermomechanical effects of a rapid depressurization in a gas cavern / P. Bérest, B. Brouard, J. Hadj-Hassen // *Acta Geotechnica*. – 2014. – Vol. 9, No. 1. – P. 181–186. DOI: 10.1007/s11440-013-0233-8.

14. Boguń, K. Cellular Automata-based computational library for development of digital material representation models of heterogenous microstructures / K. Boguń, M. Sitko, M. Mojżeszko, T. Płaczek, K. Dziuba // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 21, Article 61. – DOI: 10.1007/s43452-021-00211-9.

15. Brückner-Foit, A. Numerical simulation of micro-crack initiation of martensitic steel under fatigue loading / A. Brückner-Foit, X. Huang // *International Journal of Fatigue*. – 2006. – Vol. 28, No. 9. – P. 963–971. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.08.011

16. Carter, N.L. Creep of rock salt / N.L. Carter, F.D. Hansen // *Tectonophysics*. – 1983. – Vol. 92, No. 4. – P. 275–333. – DOI: 10.1016/0040-1951(83)90200-7.

17. Carter, N.L. Creep of rocksalt / N.L. Carter, F.D. Hansen // *Tectonophysics*. – 1983. – Vol. 92, No. 4. – P. 275–333. – DOI: 10.1016/0040-1951(83)90200-7.

18. Chang, H.P. Implementation of the Monte Carlo Library Least-Squares (MCLLS) approach for quantification of the chlorine impurity in an on-line crude oil monitoring system / H.P. Chang, I. Meric, D. Sudac, K. Nađ, J. Obhodaš, G. Hou, Y. Zhang, R.P. Gardner // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2019. – Vol. 155. – P. 197–201. – DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.05.012.

19. Chen, B.-R. Time-dependent damage constitutive model for the marble in the Jinping II hydropower station in China / B.-R. Chen, J.-F. Shao, H.-M. Li, Y.-J. Du // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2014. – Vol. 73, No. 2. – P. 499–515. DOI: 10.1007/s10064-013-0513-9.

20. Chen, J. A level set immersed finite element method for parabolic problems on surfaces with moving interfaces / J. Chen, X. Xiao, X. Feng, D. Sheen // *Journal of Computational Physics*. – 2025. – Vol. 531. – P. 113939. – DOI: 10.1016/j.jcp.2025.113939.

21. Cristescu, N. Constitutive Equations for Rock Salt / N. Cristescu // В кн.: Anisotropy and Localization of Plastic Deformation / ред. J.P. Boehler, A.S. Khan. – Dordrecht : Springer, 1991. – С. 201–204. – DOI: 10.1007/978-94-011-3644-0_47.
22. Cristescu, N. Time effects in rock mechanics / N. Cristescu, U. Hunsche. – New York : Wiley, 1998. – 350 p. : ill. – ISBN 978-0471983393.
23. Cristescu, N.D. Visco-plastic behaviour of geomaterials / N.D. Cristescu, G. Gioda. – Vienna : Springer, 1994. – 320 p. : ill. – ISBN 978-3211825822.
24. Czaikowski, O. Laborative und rechnerische Untersuchungen zu geomechanisch-geohydraulischen Wechselwirkungen im Tongestein im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle / O. Czaikowski. – 2011. – 289 S.
25. Desai, C.S. A constitutive model for quasi-static behavior of rock salt / C.S. Desai, A. Varadarajan // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1987. – Vol. 92, No. B11. – P. 11445–11456. DOI: 10.1029/JB092iB11p11445.
26. Desai, C.S. Viscoplastic model for geologic materials with generalized flow rule / C.S. Desai, D. Zhang // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 1987. – Vol. 11, No. 6. – P. 603–620. DOI: 10.1002/nag.1610110606.
27. DeVries, K.L. Salt damage criterion proof-of-concept research / K.L. DeVries, K.D. Mellegard, G.D. Callahan. – Rapid City : RESPEC Inc., 2002. – 48 p.
28. R. Littke, Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System / ред. R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski, S. Nelskamp. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. – XXIV, 519 с. – ISBN 978-3-540-85084-7. – DOI: 10.1007/978-3-540-85085-4.
29. Erbaş, İ. Magnetic dispersive micro solid phase extraction method by Fe₃O₄/Ni/Ni_xB magnetic nanoparticles for determination of endocrine disruptor pesticides / İ. Erbaş, T.D. Çiftçi, F. Pelit // Microchemical Journal. – 2023. – Vol. 191. – P. 108909. – DOI: 10.1016/j.microc.2023.108909.
30. Erbaş, İ. Magnetic dispersive micro solid phase extraction method by Fe₃O₄/Ni/Ni_xB magnetic nanoparticles for determination of endocrine disruptor pesticides / İ. Erbaş, T.D. Çiftçi, F. Pelit // Microchemical Journal. – 2023. – Vol. 191. – P. 108909. – DOI: 10.1016/j.microc.2023.108909.
31. Flügel, E. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application / E. Flügel ; with contributions by A. Munnecke. – Berlin : Springer, 2010. – 976 p. : ill. – ISBN 978-3-662-08726-8.
32. Fuenkajorn, K. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt / K. Fuenkajorn, D. Phueakphum // Engineering Geology. – 2010. – Vol. 112, No. 1–4. – P. 43–52. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.01.002

33. Fuenkajorn, K. Effects of loading rate on strength and deformability of Maha Sarakham salt / K. Fuenkajorn, T. Sriapai, P. Samsri // *Engineering Geology*. – 2012. – Vol. 135–136. – P. 10–23. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.02.012
34. Gao, R. Influential factors and control of water inrush in a coal seam as the main aquifer / R. Gao, X. Liu, X. Li, Y. Zhang, L. Wang // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2018. – Vol. 28, No. 2. – P. 187–193. – DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.12.017.
35. Greer, J.R. Plasticity in small-sized metallic systems: Intrinsic versus extrinsic size effect / J.R. Greer, J.T.M. De Hosson // *Progress in Materials Science*. – 2011. – Vol. 56, No. 6. – P. 654–724. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2011.01.005
36. Günther, R.M. Advanced strain-hardening approach constitutive model for rock salt describing transient, stationary, and accelerated creep and dilatancy / R.M. Günther, K. Salzer, T. Popp // *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. – 2010. – Paper ARMA-10-495.
37. Günther, R.M. Advanced strain-hardening approach: a powerful creep model for rock salt with dilatancy, strength and healing / R.M. Günther, K. Salzer // In: *Proceedings of the 7th Conference on Mechanical Behavior of Salt*, Paris, 16–19 April 2012. – Leiden : CRC Press/Balkema, 2012. – P. 13–22. DOI: 10.1201/b12041-6.
38. Günther, R.-M. Steady-state creep of rock salt: improved approaches for lab determination and modelling / R.-M. Günther, K. Salzer, T. Popp, C. Lüdeling // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48, No. 6. – P. 2603–2613. – DOI: 10.1007/s00603-015-0839-2.
39. Hirel, P. Why do compact grain boundary complexions prevail in rock-salt materials? / P. Hirel, M. Legros, C. Denoual, A. Demourgues // *Acta Materialia*. – 2022. – Vol. 240. – P. 118297. – DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118297.
40. Hirth, J.P. *Theory of dislocations* / J.P. Hirth, J. Lothe. – 2nd ed. – New York : John Wiley & Sons, 1982. – 857 p. : ill. – ISBN 978-0-471-03079-7.
41. Höfer, K.H. Triaxial tests on salt rocks / K.H. Höfer, K. Thoma // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. – 1968. – Vol. 5, No. 2. – P. 195–196. DOI: 10.1016/0148-9062(68)90034-X.
42. Holness, M.B. The structure of grain boundaries in halite deformed under hydrostatic conditions / M.B. Holness, S. Lewis // *Journal of Structural Geology*. – 1997. – Vol. 19, No. 6. – P. 839–852. DOI: 10.1016/S0191-8141(97)00014-7.
43. Holser, W.T. *Mineralogy of evaporites* / W.T. Holser // *Marine Minerals*. – 1979. – Vol. 6. – P. 211–294.
44. Hunsche, U. Rock salt – the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository / U. Hunsche, A. Hampel // *Engineering Geology*. – 1999. – Vol. 52, No. 3–4. – P. 271–291. DOI: 10.1016/S0013-7952(99)00011-3.

45. Hunsche, U. Uniaxial and triaxial creep and failure tests on rock: experimental technique and interpretation / U. Hunsche // In: *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials* / Eds. N.D. Cristescu, G. Gioda. – Vienna : Springer, 1994. – P. 1–53. DOI: 10.1007/978-3-7091-2710-0_1.
46. Hunsche, U.E. True triaxial failure tests on cubic rock salt samples: experimental methods and results / U.E. Hunsche // In: *Finite Inelastic Deformations—Theory and Applications*. – Berlin : Springer, 1992. – P. 525–536.
47. Jackson, M.P.A. *Salt tectonics: principles and practice* / M.P.A. Jackson, M.R. Hudec. – Cambridge : Cambridge University Press, 2017. – 498 p. : ill. – ISBN 978-1-107-09192-2.
48. James, N.P. *Origin of carbonate sedimentary rocks* / N.P. James, B. Jones. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. – 466 p. : ill. – ISBN 978-1-118-65991-7.
49. Karasev, M.A. Analysis of the stress-strain state of the shaft support in the transition zone of anhydrite-rock salt / M.A. Karasev, A.G. Protosenya, A.M. Katerov, **V.V. Petrushin** // *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* – 2022. – Vol. 37, No. 1. – P. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13
50. Kim, I.-B. A damage mechanics model of materials with voids and cracks / I.-B. Kim, C.-S. Ri, Y.-I. So // *International Journal of Damage Mechanics*. – 2016. – Vol. 25, No. 6. – P. 773–796. DOI: 10.1177/1056789515581433.
51. Langer, M. Geotechnical investigation methods for rock salt / M. Langer // *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. – 1982. – Vol. 25, No. 1. – P. 155–164. DOI: 10.1007/BF02603210.
52. Li, H. A 3D grain-based model for simulating the micromechanical behavior of salt rock / H. Li, H. Ma, X. Shi, J. Zhou, J.J.K. Daemen // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2020. – Vol. 53, No. 6. – P. 2819–2837. – DOI: 10.1007/s00603-020-02085-4.
53. Li, H. Weibull grain-based model (W-GBM) for simulating heterogeneous mechanical characteristics of salt rock / H. Li, J. Yang, Y. Han, C. Yang, J.J.K. Daemen, P. Li // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. – 2019. – Vol. 108. – P. 227–243. – DOI: 10.1016/j.enganabound.2019.09.001.
54. Liang, K. Effects of grain size distributions on the macro-mechanical behavior of rock salt using micro-based multiscale methods / K. Liang, F. Yang, C. Wang, L. Li // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2021. – Vol. 138. – Article 104592. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104592
55. Liang, K. Effects of grain size distributions on the macro-mechanical behavior of rock salt using micro-based multiscale methods / K. Liang, L.Z. Xie, B. He, P. Zhao, Y. Zhang, W.Z. Hu // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2021. – Vol. 138. – P. 104592. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104592.

56. Liang, W. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock / W. Liang, C. Li, H. Chen, J. Zhang // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2007. – Vol. 44, No. 3. – P. 400–411. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.007.
57. Liang, W.G. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock / W.G. Liang, C. Li, H.L. Chen, J.Q. Zhang // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2011. – Vol. 48, No. 1. – P. 161–167. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.06.012.
58. Liang, X. Evolution of permeability and pore structure of salt rock and its self-healing mechanism under coupled thermo-hydro-mechanical environment / X. Liang, T. Meng, Y. Zhang, J. Zhang, Y. Liu, Y. Wang // *Journal of Energy Storage*. – 2023. – Vol. 66. – P. 107476. – DOI: 10.1016/j.est.2023.107476.
59. Liu, N. Mechanical deterioration of rock salt at different confinement levels: A grain-based lattice scheme assessment / N. Liu, M. Li, W. Chen // *Computers and Geotechnics*. – 2017. – Vol. 84. – P. 210–224. – DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.12.007.
60. Liu, W. Physical simulation of construction and control of two butted-well horizontal cavern energy storage using large molded rock salt specimens / W. Liu, Y. Fan, W. Tan, H. Yang // *Energy*. – 2019. – Vol. 185. – P. 682–694. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.014.
61. Ma, L. A new elasto-viscoplastic damage model combined with the generalized Hoek–Brown failure criterion for bedded rock salt and its application / L. Ma, Q. Liu, F. Liu, H. Tan, Z. Wang // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2013. – Vol. 46, No. 1. – P. 53–66. DOI: 10.1007/s00603-012-0253-3.
62. Mark, C. Coal bursts that occur during development: A rock mechanics enigma / C. Mark // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2018. – Vol. 28, No. 1. – P. 35–42. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.11.014
63. Müller, C. Modeling deformation and damage of rock salt using the discrete element method / C. Müller, K. Lux, J. Lippmann, R. Türk, M. Vrettos // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2018. – Vol. 103. – P. 230–241. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.022
64. Munson, D.E. Constitutive model for the low temperature creep of salt (with application to WIPP) / D.E. Munson, P.R. Dawson. – Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories, 1979. – 98 p. – Report No. SAND--79-1853.
65. Odqvist, F.K.G. Kriechfestigkeit metallischer Werkstoffe / F.K.G. Odqvist, J. Hult. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 336 S. : Abb. – ISBN 978-3-662-02241-2.
66. Oliver, W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // *Journal of Materials Research*. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583. – DOI: 10.1557/JMR.1992.1564.

67. Parsai, I.E. A simplified Monte-Carlo calculation to model ion–solid interactions in the classroom / I.E. Parsai, D. Pearson, T. Kvale // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2007. – Vol. 261, No. 1–2. – P. 255–257. – DOI: 10.1016/j.nimb.2007.04.096.
68. Peach, C.J. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock / C.J. Peach, C.J. Spiers // *Tectonophysics*. – 1996. – Vol. 256, No. 1–4. – P. 101–128. – DOI: 10.1016/0040-1951(95)00170-0.
69. Pettijohn, F.J. *Sedimentary rocks* / F.J. Pettijohn, P.E. Potter, R. Siever. – 3rd ed. – New York : Harper & Row, 1975. – 628 p. : ill. – ISBN 978-0060451795.
70. Ren, Z. Micromechanics model of gas saturated coal weakened by elliptical microcracks / Z. Ren, L. Wan, X. Peng // *International Journal of Damage Mechanics*. – 2017. – Vol. 26, No. 7. – P. 1043–1060. DOI: 10.1177/1056789516648368.
71. Salzer, K. Ableitung eines kombinierten Kriechgesetzes unter Berücksichtigung der Erholung / K. Salzer. – Teilbericht zum BMFT-Vorhaben. – 1993. – T. 2.
72. Savvidy, G.K. On the Monte Carlo simulation of physical systems / G.K. Savvidy, N.G. Ter-Arutyunyan-Savvidy // *Journal of Computational Physics*. – 1991. – Vol. 97, No. 2. – P. 566–572. – DOI: 10.1016/0021-9991(91)90015-D.
73. Schreiber, B.C. Deposition and early alteration of evaporites / B.C. Schreiber, M.E. Tabakh // *Sedimentology*. – 2000. – Vol. 47. – P. 215–238. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00002.x.
74. Senseny, P.E. Mechanical behaviour of rock salt: phenomenology and micromechanisms / P.E. Senseny, J.S. Hansen, J.R. Russell, F.D. Carter, C.D. Callahan // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. – 1992. – Vol. 29, No. 4. – P. 363–378. DOI: 10.1016/0148-9062(92)90513-Y.
75. Shao, J.F. Modeling of anisotropic damage and creep deformation in brittle rocks / J.F. Shao, K.T. Chau, X.T. Feng // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2006. – Vol. 43, No. 4. – P. 582–592. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.10.004
76. Shao, J.F. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation / J.F. Shao, Q.Z. Zhu, K. Su // *Computers and Geotechnics*. – 2003. – Vol. 30, No. 7. – P. 549–555. DOI: 10.1016/S0266-352X(03)00063-6
77. Spiers, C.J. Microphysics of rocksalt flow in nature / C.J. Spiers, N.L. Carter // In: *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics* / eds. R.J. Knipe, E.H. Rutter. – Geological Society, London, Special Publications. – 1990. – Vol. 54. – P. 215–227. – DOI: 10.1144/GSL.SP.1990.054.01.21.
78. Sriapai, T. Effect of temperature on compressive and tensile strengths of salt / T. Sriapai, C. Walsri, K. Fuenkajorn // *ScienceAsia*. – 2012. – Vol. 38, No. 2. – P. 166–174. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2012.38.166.

79. Sriapai, T. True-triaxial compressive strength of Maha Sarakham salt / T. Sriapai, C. Walsri, K. Fuenkajorn // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 61. – P. 256–265. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.03.010
80. Steinbach, I. *Lectures on Phase Field* / I. Steinbach. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2023. – 182 p. : ill. – ISBN 978-3-031-21170-6.
81. Sterpi, D. Visco-plastic behaviour around advancing tunnels in squeezing rock / D. Sterpi, G. Gioda // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2009. – Vol. 42, No. 2. – P. 319–339. DOI: 10.1007/s00603-008-0175-5.
82. Sun, F. Microscale modelling of the deformation of a martensitic steel using the Voronoi tessellation method / F. Sun, E.D. Meade, N.P. O'Dowd // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2018. – Vol. 113. – P. 35–55.
83. Sun, F. Strain gradient crystal plasticity modelling of size effects in a hierarchical martensitic steel using the Voronoi tessellation method / F. Sun, E.D. Meade, N.P. O'Dowd // *International Journal of Plasticity*. – 2019. – Vol. 119. – P. 215–229. DOI: 10.1016/j.jmps.2018.01.009
84. Ter Heege, J.H. Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence on grain size and implications for rheology / J.H. Ter Heege, J.H.P. De Bresser, C.J. Spiers // *Tectonophysics*. – 2005. – Vol. 396, No. 1–2. – P. 35–57. – DOI: 10.1016/j.tecto.2004.10.002.
85. Tucker, M.E. *Carbonate sedimentology* / M.E. Tucker, V.P. Wright. – Chichester : John Wiley & Sons, 2009. – 482 p. : ill. – ISBN 978-1-4051-0130-9.
86. Urai, J. The effects of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rock salt during long-term deformation / J. Urai, C. Spiers // *6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt – SALTMECH6, Hannover, Germany, 22–25 May*. – 2007.
87. Urai, J.L. Weakening of rock salt by water during long-term creep / J.L. Urai, C.J. Spiers, H.J. Zwart, G.S. Lister // *Nature*. – 1986. – Vol. 324, No. 6097. – P. 554–557. – DOI: 10.1038/324554a0.
88. Urai, J.L. The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation / J.L. Urai, C.J. Spiers // *The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt* / eds. M. Wallner, S. Lux, W. Minkley, H. Hardy Jr. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – P. 149–158. – ISBN 978-1-131-51065025.
89. Van Sambeek, L.L. Dilatancy of rock salt in laboratory tests / L.L. Van Sambeek, J.L. Ratigan, F.D. Hansen // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. – 1993. – Vol. 30, No. 7. – P. 735–738. DOI: 10.1016/0148-9062(93)90015-6
90. Vandeginste, V. Mineralogy, microstructures and geomechanics of rock salt for underground gas storage / V. Vandeginste, Y. Ji, F. Buysschaert, G. Anoyatis // *Deep Underground Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 2, No. 2. – P. 129–147. – DOI: 10.1002/dug2.12039.

91. Wang, G. A new constitutive creep-damage model for salt rock and its characteristics / G. Wang // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2004. – Vol. 41. – P. 61–67. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2003.09.003.
92. Wang, J. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi village, Puding county, Guizhou, China / J. Wang, B. Zou, Y. Liu, Y. Tang, X. Zhang, P. Yang // *Environmental Earth Sciences*. – 2014. – Vol. 72, No. 8. – P. 2751–2764. – DOI: 10.1007/s12665-014-3182-0.
93. Wang, Y. Automated generation of mid-scale commercial space layout via centroidal Voronoi tessellation / Y. Wang, W. Wu, Y. Fei, L. Zheng // *Computers & Graphics*. – 2025. – Vol. 114. – P. 104175. – DOI: 10.1016/j.cag.2025.104175.
94. Ward, L. Including crystal structure attributes in machine learning models of formation energies via Voronoi tessellations / L. Ward, R. Liu, A. Krishna, V. I. Hegde, A. Agrawal, A. Choudhary, C. Wolverton // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 96, No. 2. – Article 024104. – DOI: 10.1103/PhysRevB.96.024104.
95. Warren, J.K. *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons* / J.K. Warren. – Berlin : Springer Science & Business Media, 2006. – 1036 p. : ill. – ISBN 978-3-540-32344-2.
96. Watanabe, T. Geometry of intercrystalline brine in plastically deforming halite rocks: inference from electrical resistivity / T. Watanabe // *Geological Society, London, Special Publications*. – 2010. – Vol. 332, No. 1. – P. 69–78. – DOI: 10.1144/SP332.5.
97. Wawersik, W.R. Mechanical behavior of New Mexico rock salt in triaxial compression up to 200 °C / W.R. Wawersik, D.W. Hannum // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1980. – Vol. 85, No. B2. – P. 891–900. DOI: 10.1029/JB085iB02p00891.
98. Wilson, J.L. *Carbonate facies in geologic history* / J.L. Wilson. – Berlin : Springer Science & Business Media, 2012. – 471 p. : ill. – ISBN 978-1-4613-9129-7.
99. Wu, F. An improved Maxwell creep model for rock based on variable-order fractional derivatives / F. Wu, J.F. Liu, J. Wang // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 73, No. 11. – P. 6965–6971. DOI: 10.1007/s12665-015-4137-9.
100. Yang, C. Experimental investigation of creep behavior of salt rock / C. Yang, J.J.K. Daemen, J.-H. Yin // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1999. – Vol. 36, No. 2. – P. 233–242. DOI: 10.1016/S0148-9062(98)00187-9
101. Yang, C. Feasibility analysis of using closely spaced caverns in bedded rock salt for underground gas storage: a case study / C. Yang, N. Zhang, W. Tan, Y. Fan // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 75, No. 15. – P. 1–15. DOI: 10.1007/s12665-016-5944-3

102. Yang, W. Time-dependent behavior of diabase and a nonlinear creep model / W. Yang, G. Wang, Y. Zhang, L. Wang // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014. – Vol. 47, No. 4. – P. 1211–1224. DOI: 10.1007/s00603-013-0454-1.
103. Yang, Y. Experimental and theoretical studies on the creep behavior of warm ice-rich frozen sand / Y. Yang, Y. Lai, X. Chang // *Cold Regions Science and Technology*. – 2010. – Vol. 63, No. 1–2. – P. 61–67 DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.011
104. Zeng, Z. Characterizing imbibition and void structure evolution in damaged rock salt under humidity cycling by low-field NMR / Z. Zeng, H. Ma, C. Yang, K. Zhao, H. Li, H. Yu, H. Li, Z. Zheng // *Engineering Geology*. – 2024. – Vol. 328. – P. 107371. – DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107371.
105. Zhang, H. Analysis of deformation and failure of sediment particle-surrounding rock structure of salt cavern gas storage under the coupled action of temperature and pressure / H. Zhang, H. Yu, Q. Wanyan, L. Ran // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 243. – P. 213330. – DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213330.
106. Zhang, L. A creep model with damage based on internal variable theory and its fundamental properties / L. Zhang, Y. Liu, Q. Yang // *Mechanics of Materials*. – 2014. – Vol. 78. – P. 44–55. DOI: 10.1016/j.mechmat.2014.07.017.
107. Zhang, N. Stability and availability evaluation of underground strategic petroleum reserve (SPR) caverns in bedded rock salt of Jintan, China / N. Zhang, J. Shi, D. Wang, Y. Chen // *Energy*. – 2017. – Vol. 134. – P. 504–514. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.073.
108. Zhang, X. A multiple level set method for modeling grain boundary evolution of polycrystalline materials / X. Zhang, Z. Yao, Z. Xu, X. Lin, Y. Liu // *Interaction and Multiscale Mechanics*. – 2008. – Vol. 1, No. 2. – P. 191–209. – DOI: 10.12989/IMM.2008.1.2.191.
109. Zhang, Y. Pore network simulation of HT-PEMFC GDL using radical Voronoi tessellation / Y. Zhang, L. Wang, M. Chen, X. Liu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2025. – Vol. 246. – P. 127025. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127025.
110. Zhang, Z. Compaction of granular halite by pressure solution at room temperature and effects of humidity / Z. Zhang, C.J. Spiers // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2005. – Vol. 110, B5. – P. 1–17. – DOI: 10.1029/2004JB003318.
111. Zhang, Y. A novel method for rapid detection of foodborne pathogens using microfluidic chip-based PCR / Y. Zhang, L. Chen, M. Li, X. Wang // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2025. – Vol. 114. – P. 107541. – DOI: 10.1016/j.jfca.2025.107541.
112. Zhao, Y. Improved level set method for particle reconstruction from X-ray tomography images / Y. Zhao, L. Wang, M. Liu, J. Zhang // *Powder Technology*. – 2025. – Vol. 427. – P. 120743. – DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120743.

113. Zheng, X. Modeling of polycrystalline material microstructure with 3D grain boundary based on Laguerre–Voronoi tessellation / X. Zheng, T. Sun, J. Zhou, R. Zhang, P. Ming // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, No. 6. – Article 1996. – DOI: 10.3390/ma15061996.

114. Zhi, Y. Review on Cellular Automata for Microstructure Simulation of Metallic Materials / Y. Zhi, Y. Jiang, D. Ke, X. Hu, X. Liu // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 6. – Article 1370. – DOI: 10.3390/ma17061370.

115. Zhou, H.W. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives / H.W. Zhou, Y.L. Liu, H.S. Liu, W.H. Chen // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2011. – Vol. 48, No. 1. – P. 116–121. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.11.004

116. Zhou, J. Modeling of polycrystalline material microstructure with 3D grain boundary based on Laguerre–Voronoi tessellation / J. Zhou, R. Zhang, P. Ming // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, No. 6. – Article 1996. – DOI: 10.3390/ma15061996.

117. Zöllner, D. Normal grain growth: Monte Carlo Potts model simulation and mean-field theory / D. Zöllner, P. Streitenberger // In: *Micro-Macro-Interaction* / eds. A. Bertram, J. Tomas. – Berlin : Springer, 2008. – P. 3–18. – DOI: 10.1007/978-3-540-85715-0_1.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Акт внедрения**

АО «Гипроцветмет»
Звездный бульвар, д. 23, стр. 10, эт. 2, пом. 1
Москва, а/я 25, 129075
Тел.: +7 (495) 600-32-00, e-mail: office@giprocm.ru
ОКПО 00198404, ОГРН 1137746314640
ИНН/КПП 7717750345/771701001

Утверждаю

Управляющий директор

А.Д. Куранов



Дата « 28 » 11 2024 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации аспиранта
Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II,
Петрушина Владислава Владимировича, обучающегося по научной специальности
2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и
горная теплофизика.

Рабочая комиссия в составе: председателя комиссии - директора по инженерным изысканиям и полевым работам Тимохина Вадима Анатольевича, а также членов комиссии – начальника отдела горных работ Гордымова Александра Николаевича, ведущего инженера отдела горных работ Семенова Александра Сергеевича - составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Прогноз геомеханических процессов в окрестности породных обнажений в соляных массивах на макромасштабном уровне», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы при ведении проектной и экспертной работы в деятельности АО «Гипроцветмет» при разработке технико-коммерческих предложений в части сопровождения проектирования крепей стволов в части:

- обоснования состава инженерно-геологических изысканий
- регламентации применения достоверных методик расчета;
- регламентации требований к численному моделированию.

Использование указанных результатов позволяет повысить качество проектирования подземных горных работ, произвести достоверную оценку устойчивости горной выработки и нагрузки на её крепь, за счет проведенного исследования напряженно-деформированного состояния горных выработок и изучения возможности применения конечно-дискретной модели для анализа процесса разрушения в окрестности породных обнажений.

По результатам совместных разработок получено 0 патентов.

Председатель комиссии

Директор по инженерным изысканиям
и полевым работам



Тимохин В.А.

Члены комиссии:

Начальник отдела горных работ



Гордымов А.Н.

Ведущий инженер отдела горных работ,
канд. техн.наук



Семенов А.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023619605

Программа для внедрения когезионных элементов в
сетку сплошных элементов первого порядка в Abaqus
CAE

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Петрушин Владислав Владимирович (RU), Карасёв
Максим Анатольевич (RU)*



Заявка № 2023618322

Дата поступления 27 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 мая 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2023619605**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):
2023619605
Дата регистрации: 12.05.2023
Номер и дата поступления заявки:
2023618322 27.04.2023
Дата публикации и номер бюллетеня:
12.05.2023 Бюл. № 5

Автор(ы):
Петрушин Владислав Владимирович (RU),
Карасёв Максим Анатольевич (RU)
Правообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа для внедрения когезионных элементов в сетку сплошных элементов первого порядка в Abaqus CAE

Реферат:

Программа предназначена для внедрения метода конечно-дискретных элементов в программный пакет Abaqus CAE, для реализации возможности моделирования дискретных сред, а также деформирования и разрушения горных пород. Программа внедряет в сетку сплошных линейных конечных элементов когезионные элементы нулевой толщины, которые позволяют описать процесс разрушения в явном виде с учетом макроструктурных особенностей материала. В качестве исходных данных используется файл, формируемый программой Abaqus CAE, который содержит сведения о сетке конечных элементов.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 9,5 МБ