

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*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Карасев Максим Анатольевич

Официальные оппоненты:

Ашихмин Сергей Геннадьевич

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, профессор;

Румянцев Александр Евгеньевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», лаборатория геотехники, заведующий лабораторией.

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

Защита диссертации состоится **15 июля 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

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

Автореферат разослан 15 мая 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ

Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 напряженно-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 обработке 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 иницирования 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, Günther 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 Вороного, 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 Вороного для формирования поликристаллических структур каменной соли.

3. Лабораторные исследования деформирования и разрушения соляных пород на макроструктурном 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 напряжённо-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 влияния 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 реальным 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 влияние 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 28.04.2024 г., утвержден управляющим директором Курановым А.Д.

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.

На защиту выносятся следующие положения:

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 ожидается запредельное деформирование породного контура.

Публикации:

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, 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 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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 странице машинописного текста, содержит 33 рисунка и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ степени изученности проблемы макроструктурного представления соляных пород как в рамках механики сплошной среды, так и в рамках механики дискретных сред. Рассмотрены существующие модели деформирования, описывающие поведение соляных пород. Проанализированы существующие подходы к учету влияния макроструктурных особенностей солей при моделировании их механического поведения. Сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе разработаны экспериментально-теоретические положения представления структуры соляных пород, а также разработана методика генерации их синтетической структуры в рамках существующих программных решений. Глава содержит обоснование метода определения прочностных характеристик отдельных кристаллов соли при их нагружении сферическими инденторами. Также были определены усредненные прочностные показатели кристаллов галита, которые будут использованы как исходные параметры при выполнении численного моделирования деформирования солей. Таким образом, в данной части работы сформулирован комплексный алгоритм формирования исходных параметров модели, предназначенной для оценки напряжённо-деформированного состояния солей на макроструктурном уровне в явном виде.

В третьей главе сформулированы теоретические положения методологического подхода к численному моделированию механического поведения солей, рассматриваемых как конечно-дискретная

среда. В работе детально описаны законы, регулирующие процессы деформирования кристаллических структур, включая механизмы перехода между упругими и пластическими состояниями, а также закономерности разупрочнения когезионных связей между элементами дискретной сетки. Экспериментально изучено влияние масштабного эффекта, проявляющегося в изменении прочностных и деформационных характеристик образцов при варьировании их геометрических параметров в условиях разнородных видов напряжённого состояния, включая одноосное сжатие, растяжение и сложное объемное нагружение. Количественно определена степень влияния геометрической формы кристаллических зерен на распределение напряжений и формирование магистральных трещин, приводящих к разрушению образцов. Полученные результаты позволили установить корреляцию между морфологией структурных элементов и макромеханическим откликом материала.

В четвертой главе представлены решения прикладных задач по оценке характера деформирования породного целика при обработке соляных месторождений, а также по оценке характера разрушения стенок скважины. В результате решения прикладных задач продемонстрированы возможности разработанного метода и рассмотрены области его применения для задач геомеханики.

В заключении сформулированы основные результаты проведенного исследования, а также направления дальнейших исследований в данной области науки.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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

Соляные породы представляют собой поликристаллические структуры, где механические свойства определяются как индивидуальными характеристиками кристаллов галита, так и их границами.

При нагрузках, близких к предельным, деформация развивается неоднородно: возникают микросдвиги по границам зерен, раскрытие трещин и дилатансия. Традиционные модели сплошной среды не способны воспроизвести эти процессы, так как нивелируют дискретность структуры. В отличие от них, конечно-дискретный подход рассматривает породу как совокупность взаимодействующих поликристаллов, что позволяет в явном виде представлять межзерновые границы и их влияние на макроповедение. Для воссоздания поликристаллической структуры использовался метод тесселяции Вороного, который делит пространство на ячейки (зерна) вокруг случайно распределенных центров, обеспечивая реалистичное распределение размеров и форм кристаллов. Каждое зерно моделируется как упругопластическое тело, а границы между ними обладают свойствами контактных поверхностей с заданной прочностью и жесткостью, что позволяет учесть хрупкое разрушение по границам зерен и пластическую деформацию внутри них.

В работе представлен алгоритм формирования численных моделей на основании представления соляных пород как поликристаллических структур, которые могут быть описаны посредством тесселяции Вороного (рисунок 1). В исследовании были воспроизведены классические испытания горных пород на одноосное и трехосное сжатие, а также испытания бразильским методом. Так, при моделировании одноосного сжатия поликристаллической структуры, сгенерированной методом Вороного, наблюдаются характерные этапы деформирования: упругая деформация, развитие пластических сдвигов вдоль границ зерен, локализация напряжений в зонах контакта кристаллов и последующее хрупкое разрушение. Полученные кривые «напряжение–деформация» демонстрируют количественное соответствие с экспериментальными данными, включая значения предельной прочности (15 – 25 МПа для каменной соли) и модуля Юнга (20 – 30 ГПа). Аналогично, при трехосном сжатии модель адекватно воспроизводит увеличение прочности материала при росте всестороннего давления, что соответствует физическому поведению солей в глубинных пластовых условиях. Например, при боковом давлении 5 МПа прочность образца возрастает до 40 – 50 МПа, что согласуется

с лабораторными испытаниями. Характерный механизм деформирования и разрушения образца при одноосном сжатии представлен на рисунке 2.

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.

Паспорта прочности, полученные в ходе численных экспериментов (совокупность параметров: прочность на сжатие, растяжение, угол внутреннего трения, сцепление), статистически сопоставимы с данными лабораторных испытаний (рисунок 3). Например, для каменной соли значения сцепления (C) в модели варьируются в диапазоне 3 – 5 МПа, угла внутреннего трения (φ) — 30 – 40°, что находится в пределах погрешности реальных измерений.

Кроме количественных показателей, модель корректно воспроизводит качественные особенности разрушения породы: формирование сетки микротрещин вдоль границ зерен, анизотропию деформаций из-за случайной ориентации кристаллов, масштабный эффект при переходе от микро- к макроуровню. Это позволяет утверждать, что рассматриваемый метод не только обеспечивает повышение достоверности расчета напряжений и деформаций в породе, но и раскрывает физические механизмы, лежащие в основе деформирования поликристаллических сред.

Таким образом, сочетание адекватности математического аппарата, воспроизводимости ключевых прочностных параметров и соответствия качественной картины разрушения подтверждает, что моделирование на основе тесселяции Вороного является надежным методом для прогнозирования механического поведения соляных пород в широком диапазоне нагружений.

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.

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 посредством введения закона деформирования и разрушения межкристаллических связей (рисунок 4). 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). Такой переход свидетельствует о смене доминирующего механизма разрушения: от пластического деформирования к хрупкому (рисунок 4 в).

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 микрповреждений. 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 межзерненным 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.

Результаты исследования имеют важное прикладное значение для прогнозирования устойчивости соляных массивов. 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. 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.

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 (рисунок 5).

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 возникла на 20 – 30% раньше, что связано с локальным нарушением сцепления между кристаллами — эффект, принципиально недостижимый в рамках теорий сплошной среды (рисунки 6).

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 газопорных 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

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

2. 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

3. Карасев М.А. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макро-структурном 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. 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

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. 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»



Рисунок 1 – Алгоритм подготовки синтетической модели прогноза НДС состояния соляных пород

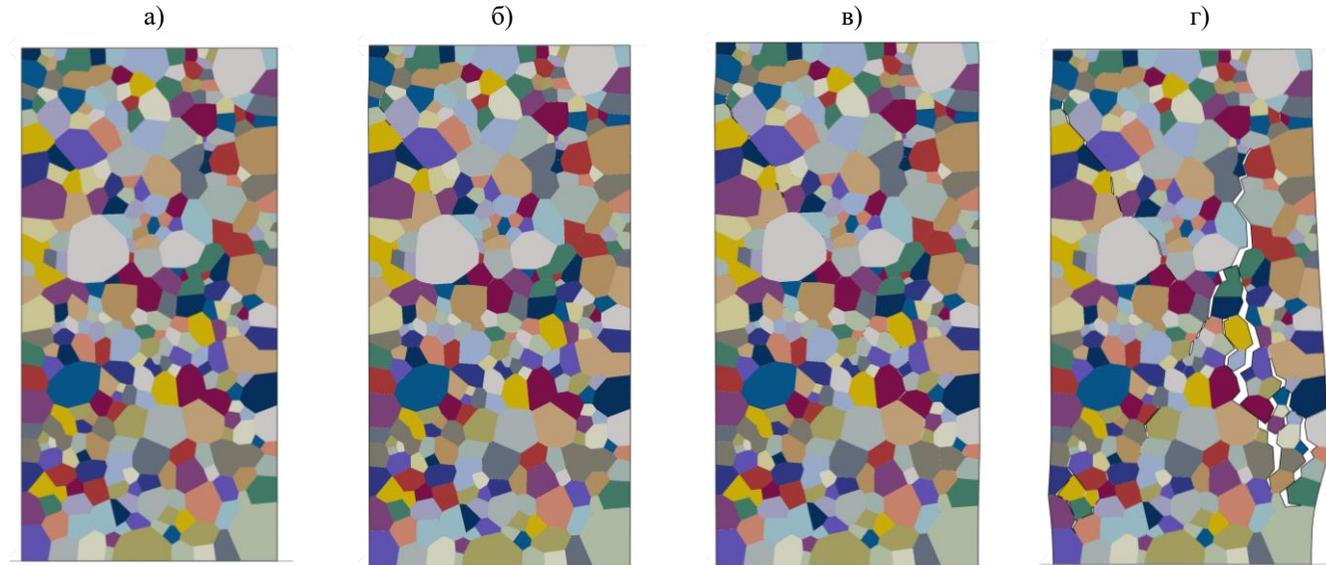
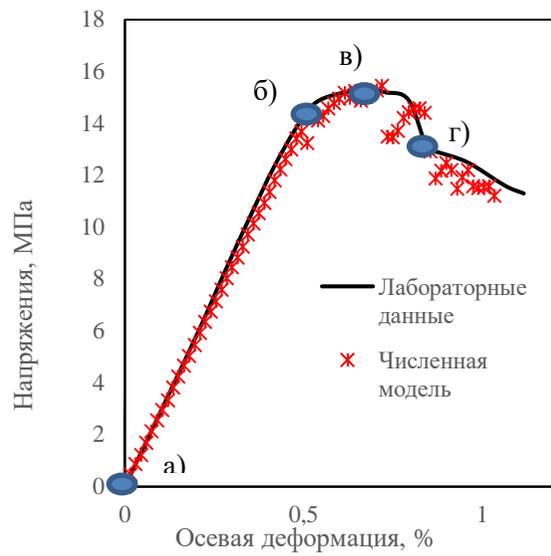


Рисунок 2 – Этапы деформирования и разрушения образца каменной соли при виртуальном испытании на одноосное сжатие

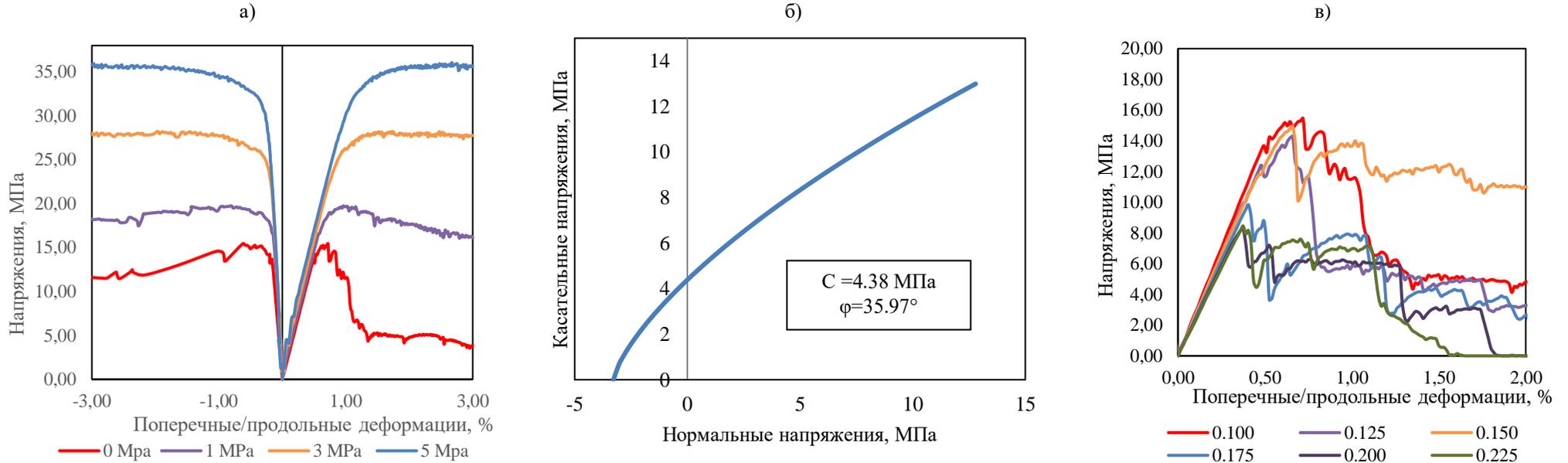


Рисунок 3 – Результаты численных испытаний характерного образца каменной соли диаметром 40 мм и высотой 80 мм: а) кривые деформирования при различных видах напряженного состояния, б) паспорт прочности, в) кривые деформирования образцов с разными значениями округлости зерен

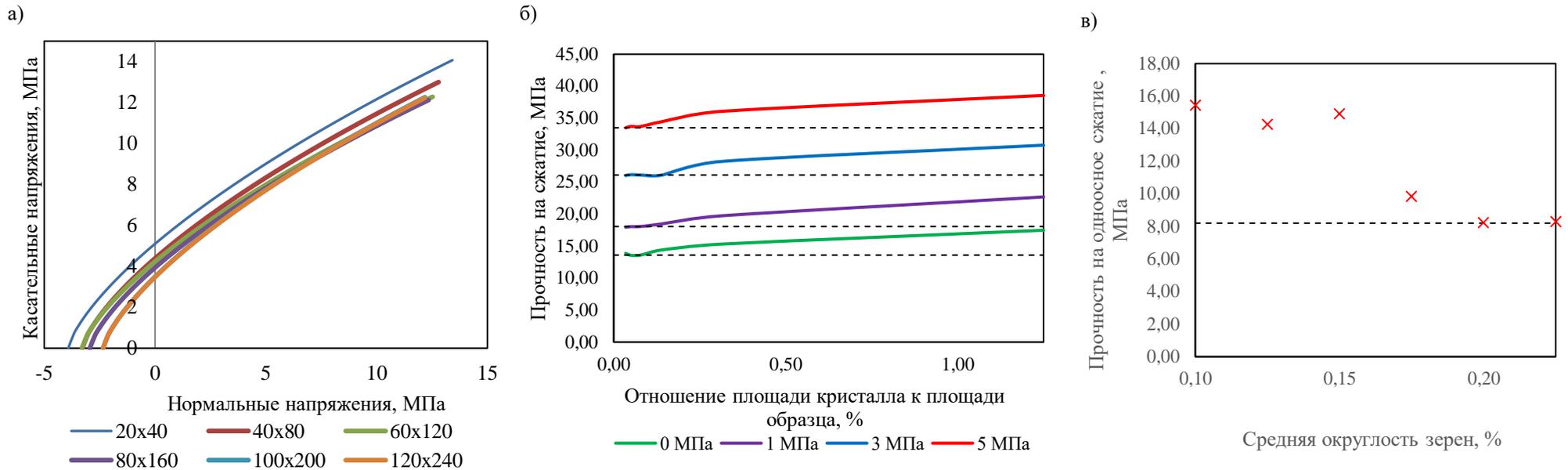


Рисунок 4 – Масштабный эффект: а) паспорта прочности при различных размерах образцов, б) выявление масштабного эффекта при различных значениях бокового давления, в) влияние степени округлости

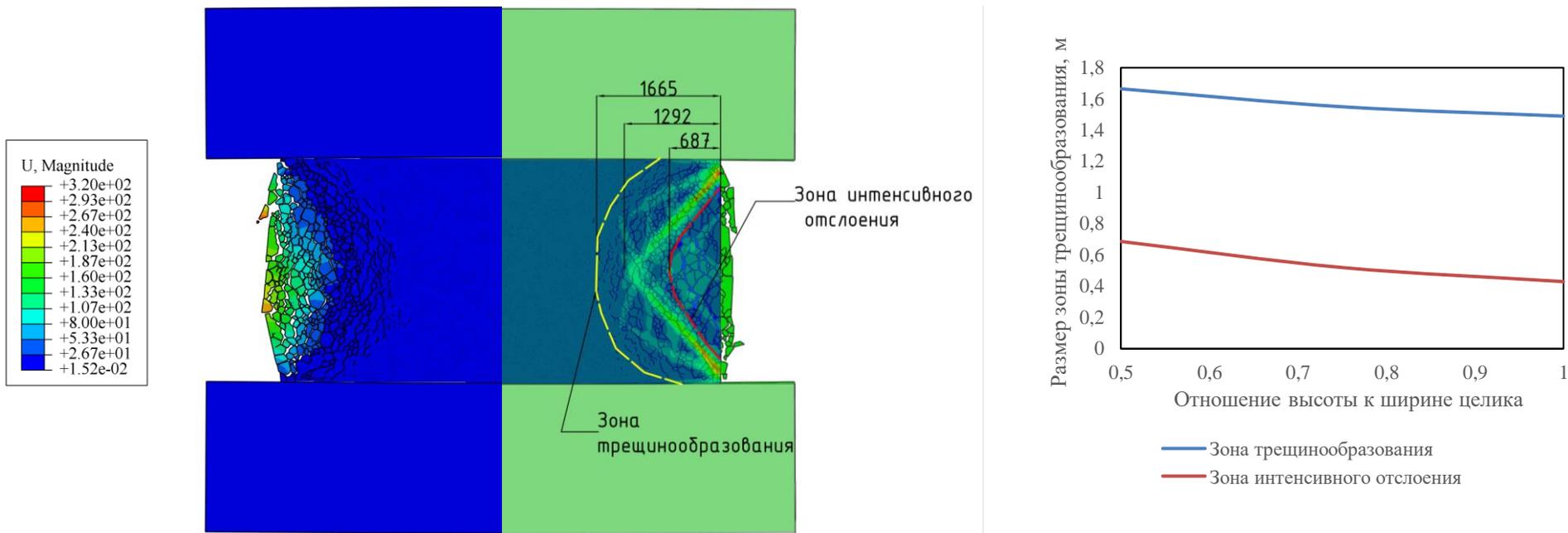


Рисунок 5 – Локализация зон трещинообразования в целиках с различным соотношением высоты к ширине

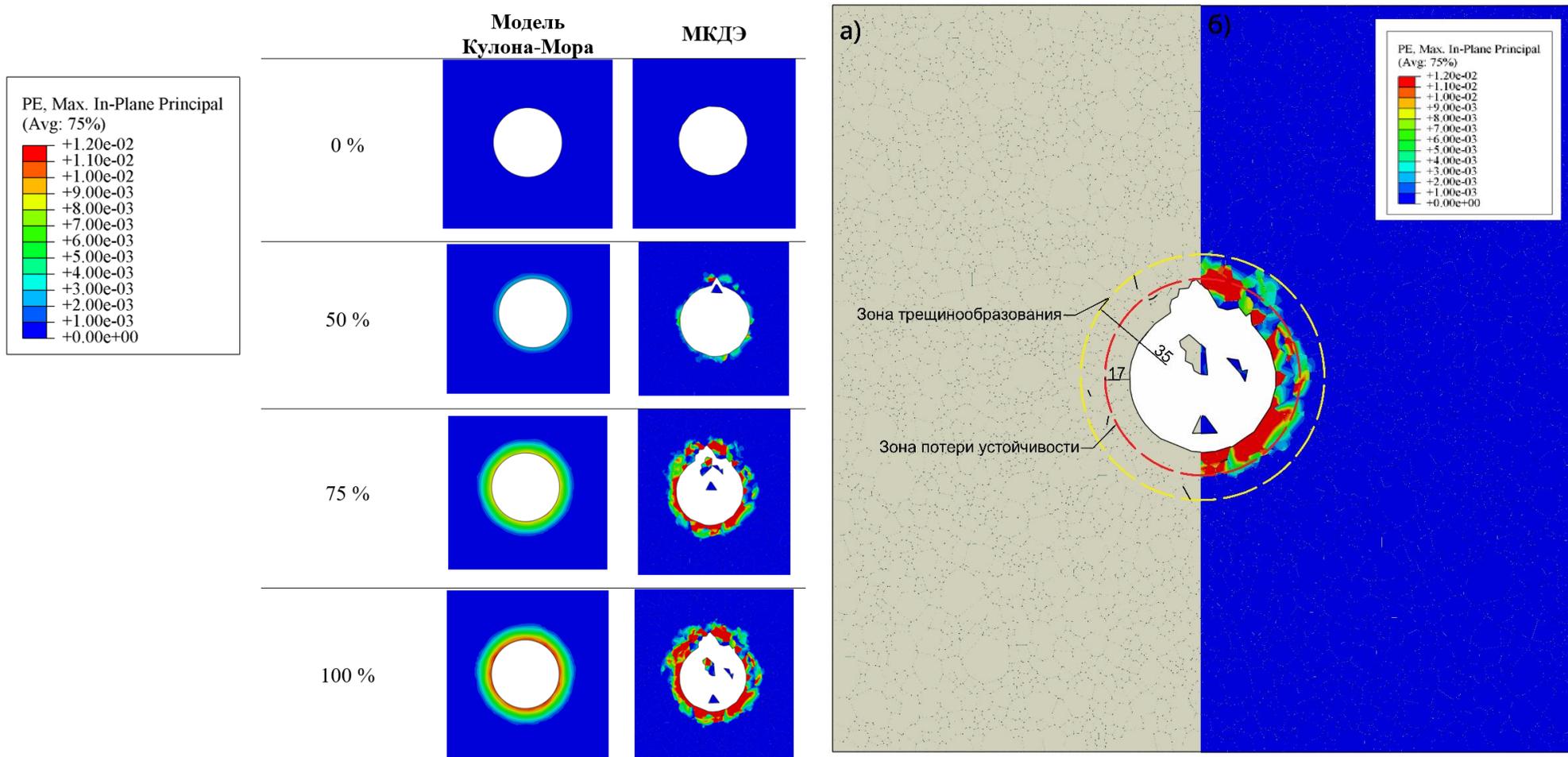


Рисунок 6 – Иллюстрация процесса деформирования и разрушения стенок скважины диаметром 100 мм: а) картина развития трещинообразования, б) эпюра развития пластических деформаций в зернах